

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

Вовна О.В.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2021 р.

Випускна кваліфікаційна робота

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка та дослідження оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю»

Виконала: студентка 2 курсу, групи ІВТЗм-19

(шифр групи)

спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Переверзєва Наталія Валеріївна

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник завідувач кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

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

О.В. Вовна

(підпис)

Рецензент _____

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

(підпис)

Рецензент _____

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

(підпис)

*Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.*

Студент _____

(підпис)

Покровськ – 2021 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки

(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____

(дата)

з оцінкою _____

Секретар ДЕК _____

(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота

магістра

Тема: «Розробка та дослідження оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю»

Спецчастина: _____

Виконавець, студентка

гр. ІВТзм – 19

Перeverзєва Н.В.

(підпис, дата, П.І.П)

Керівник

проф. Вовна О.В.

(підпис, дата, П.І.П)

Консультанти:

проф. Зорі А.А.

(підпис, дата, П.І.П)

проф. Вовна О.В.

(підпис, дата, П.І.П)

доц. Лактіонов І.С.

(підпис, дата, П.І.П)

ст. викл. Тюрін Є.А.

(підпис, дата, П.І.П)

Нормоконтроль

проф. Вовна О.В.

(підпис, дата, П.І.П)

Покровськ – 2021

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра Електронна техніка

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування

(шифр і назва)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Вовна О.В.

« _____ » 2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Переверзєва Наталія Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка та дослідження оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю
керівник проекту (роботи) Вовна Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 29.01.2021 року № 35

2. Строк подання студентом проекту (роботи)

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз технічних характеристик об'єкту; математична модель вимірювального каналу; обґрунтування та розробка структури інформаційно-вимірювальної системи; розробка структурної та принципової схем інформаційно-вимірювальної системи

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	д.т.н., проф., зав. каф. ЕТ Вовна О.В.		
2	д.т.н., проф., проф. каф. ЕТ Зорі А.А.		
3	д.т.н., проф., зав. каф. ЕТ Вовна О.В.		
4	к.т.н., доц., доц. каф. ЕТ Лактіонов І.С.		
А	ст. викл каф. ОП Тюрін Є.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Тенденції та специфіка розвитку інформаційно-вимірювальних систем концентрації газів, що забруднюють атмосферу		
2	Розробка математичної моделі каналу вимірювання концентрації оксиду вуглецю		
3	Дослідження метрологічних характеристик розробленого вимірювача концентрації оксиду вуглецю		
4	Обґрунтування та розробка структури оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю		
5	Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві		

Студент _____

(підпис)

Перeverзєва Н.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Вовна О.В.

(прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада П.І.Б.	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Переверзєва, Н.В. Розробка та дослідження оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2021.

Пояснювальна записка: 78 стор., 19 рис., 5 табл., 25 посилань.

Отримала подальший розвиток модель спектрального представлення поглинання оптичного випромінювання в інфрачервоній області спектра оксидом вуглецю, яка пов'язує такі параметри, як довжина хвилі оптичного поглинання, зміна інтенсивності поглинання оптичного випромінювання оксидом вуглецю в діапазоні довжин хвиль, а також такі дестабілізуючі фактори, як зміна температури та тиску. Отримала подальший розвиток математична модель оптичного блоку інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю, яка пов'язує між собою переважну більшість дестабілізуючих факторів, зміна яких впливає на розповсюдження інфрачервоного випромінювання в оптичному каналі системи.

Обґрунтовано та розроблено спосіб компенсації впливу зміни температури й тиску газової суміші на результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю, який базується на масштабуванні вимірювальної величини перетворювачем. Розроблено структуру системи для реалізації запропонованого способу, величини відносна похибка вимірювання концентрації оксиду вуглецю складає $\pm 2,1\%$, це значення відносної похибки не перевищують допустимого, тому реалізація засобів компенсації зміни дестабілізуючих факторів є обґрунтованою.

Ключові слова: вимірювання, концентрація, оксид вуглецю, оптичний метод, спосіб корекції, похибка, система.

ABSTRACT

Pereverzieva, N.V. Development and research of the optical-acoustic information-measuring system for the carbon monoxide concentration determining / Graduation qualification work for obtaining an educational degree 'Master' in specialty 152 'Metrology and information-measuring technique'. – SHEI 'DonNTU', Pokrovsk, 2021.

Explanatory note: 78 p., 19 fig., 5 table, 25 references.

The model of the spectral representation of the absorption of optical radiation in the infrared region of the spectrum by carbon monoxide has been further developed, which connects such parameters as the wavelength of optical absorption, and pressure. The mathematical model of the optical unit of the information-measuring system for determining the concentration of carbon monoxide has been further developed, which connects the vast majority of destabilizing factors, the change of which affects the propagation of infrared radiation in the optical channel of the system.

The method of compensation of the influence of temperature and pressure change of the gas mixture on the result of measuring the concentration of carbon monoxide, which is based on the scaling of the measured value by the transducer, is substantiated and developed. The structure of the system for the implementation of the proposed method is developed, the values of the relative error of measuring the concentration of carbon monoxide is $\pm 2.1\%$, this value of the relative error does not exceed the allowable, so the implementation of means to compensate for changes in destabilizing factors is justified.

Key words: measurement, concentration, carbon monoxide, optical method, correction method, error, system

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ТЕНДЕНЦІЇ ТА СПЕЦИФІКА РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ, ЩО ЗАБРУДНЮЮТЬ АТМОСФЕРУ.....	12
1.1 Напрями розробки сучасних газоаналітичних інформаційно-вимірювальних систем.....	12
1.2 Аналіз методів вимірювального контролю концентрації оксиду вуглецю.....	17
1.3 Аналіз засобів вимірювального контролю концентрації оксиду вуглецю.....	25
1.4 Напрямок та завдання досліджень, що виконуються в роботі.....	31
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КАНАЛУ ВІМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ.....	32
2.1 Математична модель у спектральному діапазоні поглинання оптичного випромінювання оксидом вуглецю.....	32
2.2 Математична модель джерела випромінювання в оптичному діапазоні.....	35
2.3 Математична модель оптичної неоднорідності в каналі вимірювання оксиду вуглецю.....	38
2.4 Математична модель формування вхідного сигналу оптичного вимірювача концентрації оксиду вуглецю.....	41
2.5 Математична модель спектральної характеристики фотоприймача вимірювального каналу.....	43
2.6 Математична модель формування вихідного електричного сигналу вимірювального каналу.....	45
2.7 Висновки.....	49

3 ДОСЛІДЖЕННЯ	МЕТРОЛОГІЧНИХ	ХАРАКТЕРИСТИК	
РОЗРОБЛЕНОГО	ВИМІРЮВАЧА	КОНЦЕНТРАЦІЇ	ОКСИДУ
ВУГЛЕЦЮ.....			50
3.1 Дослідження	метрологічних	характеристик	вимірювача
концентрації оксиду вуглецю під час зміни дестабілізуючих факторів....			50
3.2 Розробка компенсації змін температури й тиски на результат			
вимірювання концентрації оксиду вуглецю.....			53
3.3 Дослідження метрологічних характеристик під час функціонування			
вимірювального каналу системи.....			62
3.4 Висновки.....			65
4 ОБҐРУНТУВАННЯ	ТА	РОЗРОБКА	СТРУКТУРИ
ОПТИКО-			
АКУСТИЧНОЇ	ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ	СИСТЕМИ	
ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ.....			66
ВИСНОВКИ.....			68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....			70
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях			
на підприємстві.....			72

ВСТУП

Актуальність теми. Постійно зростаючі вимоги до джерел забруднення атмосфери вимагає суттєвого вдосконалювання експлуатаційних і метрологічних характеристик відповідних засобів вимірювального контролю. Зазначені вимоги стосуються функцій, що виконує газоаналітичні вимірювачі концентрації газових компонентів таких, як кількість компонентів, що одночасно вимірюються, зменшення нижньої межі ідентифікації, підвищення точності вимірювання, збільшення інтервалу між повірками та ін. Також має місце вдосконалення значень експлуатаційних показників, а саме зменшення габаритів, маси, а також потужності, що споживає газоаналітичний вимірювач, підвищуються вимоги до обслуговування, а також надійність цих систем. Одним зі шляхів удосконалення цих вимірювачів є забезпечення автоматизації контрольних операцій, що може бути виконано на базі мікроконтролерів. Застосовування зазначених апаратно-програмних засобів дозволяє одночасно виконувати діагностику характеристик газоаналітичних вимірювачів та здійснювати корекції його результатів вимірювання під час зміни дестабілізуючих факторів.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності та швидкодії інформаційно-вимірювальних систем контролю концентрації оксиду вуглецю.

Для досягнення зазначеної мети в дослідженні представлені **такі задачі:**

- виконати аналіз тенденцій та специфіки розвитку інформаційно-вимірювальних систем концентрації газів, що забруднюють атмосферу;
- розробити математичну модель каналу вимірювання концентрації оксиду вуглецю;
- виконати дослідження метрологічних характеристик розробленого вимірювача концентрації оксиду вуглецю;
- обґрунтувати та розробити структуру оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю.

Об'єкт дослідження: процеси, що протікають у вимірювальних каналах газоаналітичної оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи концентрації оксиду вуглецю.

Предмет дослідження: методи та засоби підвищення точності та швидкодії під час вимірювання концентрації оксиду вуглецю оптико-акустичним вимірювачем.

Методи дослідження базуються на положеннях теорії вірогідності та математичної статистики, теорії інформаційно-вимірювальних систем та систем, теорії випадкових процесів, теорії планування наукового експерименту, комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Отримала подальший розвиток модель спектрального представлення поглинання оптичного випромінювання в інфрачервоній області спектра оксидом вуглецю, яка пов'язує такі параметри, як довжина хвилі оптичного поглинання, зміна інтенсивності поглинання оптичного випромінювання оксидом вуглецю в діапазоні довжин хвиль, а також такі дестабілізуючі фактори, як зміна температури та тиску.

2. Отримала подальший розвиток математична модель оптичного блоку інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю, яка пов'язує між собою переважну більшість дестабілізуючих факторів, зміна яких впливає на розповсюдження інфрачервоного випромінювання в оптичному каналі системи.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Обґрунтовано та розроблено спосіб компенсації впливу зміни температури й тиску газової суміші на результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю, який базується на масштабуванні вимірювальної величини перетворювачем.

2. Розроблено структуру системи для реалізації запропонованого способу, величини відносна похибка вимірювання концентрації оксиду вуглецю складає $\pm 2,1 \%$, це значення відносної похибки не перевищують допустимого, тому

реалізація засобів компенсації зміни дестабілізуючих факторів є обґрунтованою.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати кваліфікаційної роботи магістра одержані автором самостійно. Автором особисто: виконаний аналіз тенденцій та специфіки розвитку інформаційно-вимірювальних систем концентрації газів, що забруднюють атмосферу; розроблено математичну модель каналу вимірювання концентрації оксиду вуглецю; виконано дослідження метрологічних характеристик розробленого вимірювача концентрації оксиду вуглецю; обґрунтовано та розроблено структуру оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю.

Апробація результатів роботи. Основні розділи роботи пройшли апробацію на наукових семінарах кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (м. Покровськ, 2019 – 2021 рр.).

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Структура кваліфікаційної роботи магістра визначена загальною схемою наукового дослідження, метою досліджень та шляхами її досягнення. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, основних висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи містить 78 сторінок машинописного тексту, зокрема 71 сторінка основного тексту, 19 рисунків, 5 таблиць і список використаних джерел із 25 найменувань.

1 ТЕНДЕНЦІЇ ТА СПЕЦИФІКА РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ, ЩО ЗАБРУДНЮЮТЬ АТМОСФЕРУ

1.1 Напрями розробки сучасних газоаналітичних інформаційно-вимірювальних систем

Однією з складних проблем, що виникає в сучасних газоаналітичних вимірювачах, є створення ефективних методів і засобів вимірювального контролю концентрації газів, що забруднюють атмосферу. Складність цієї проблеми утворюється під час газового аналізу токсичних компонентів зі застосуванням методів, що мають високу чутливість до вимірювання мікроконцентрацій з верхньою межею вимірювання від 10^{-4} до 10^{-3} об.%, а також ультрамікроконцентрацій з межею вимірювання до 10^{-4} об.%. Також ця проблема виникає під час аналізу окремих компонентів газової суміші з їх гранично-допустимими концентраціями та специфічними умовами застосування методів вимірювання під час багатокомпонентного аналізу газової суміші [1].

Існує досить велика кількість відомих методів газоаналітичного аналізу, що обумовлено значною кількістю компонентів газової суміші, що може бути визначено зі значною кількістю їх фізико-хімічних властивостей. Стрімке збільшення обсягів виробництва суттєво забруднює атмосферу різними компонентами. Це сприяє розвитку газоаналітичної галузі завдяки розробці нових методів вимірювання та створення засобів автоматизованого та автоматичного вимірювального контролю, а також новим конструктивним рішенням.

Методи і засоби газоаналітичного вимірювального контролю розвиваються в лабораторному та промисловому напрямках. «Аналітичні методи лабораторного аналізу поділяють на три основні групи» [1]:

- хімічні;
- інструментальні;
- біологічні.

До хімічних методів аналізу відносять: об'ємний; ваговий; нефелометричний; колориметричний; турбодиметричний, хроматографічний та люмінесцентний. Найбільше поширення отримав мікроколориметричний метод аналізу. Цей метод має високу чутливість до експрес-аналізу слідів формальдегіду, концентрацій пилю та пару металів, оксидів азоту, аміаку, сірководню, хлору, фтору, оксиду вуглецю та достатньо великої кількості неорганічної та органічної сполуки. Хімічний метод є простим під час реалізації але він не використовується для вимірювального контролю в режимі реального часу. Аналіз цим методом здійснюється під час епізодичного відбору проби та попередньою їх обробкою за допомогою збагачення та екстрагування. Такі інструментальні методи, як вимірювання «дифракції рентгенівських променів, спектрофотометрія іонізаційна хроматографія, ультразвуковий, рефрактометричний, мікроскопія та радіоактивний є дуже складними під час реалізації» [1, 2]. Зазначені методи застосовуються тільки в умовах дослідних лабораторій, та не використовуються в умовах промисловості. На сьогоднішній день не отримали використання для здійснення автоматичного вимірювального контролю біологічні методи. Ці методи мають високу чутливість, проте вони визначають якісну оцінку під час визначення компонента, що вимірюється.

На відміну від прецизійних інструментальних засобів, що мають високу чутливість, та призначено для промислових і науково-дослідних лабораторій, які можуть функціонувати тривалий час під керуванням персоналу, який має високу кваліфікацію, автоматичні інформаційно-вимірювальні системи визначення концентрації газових компонентів, що забруднюють повітря, повинні забезпечувати автоматичний відбір проб атмосферного повітря або потоку газів, що відходять, та здійснення аналізу без участі оператора під час дії складних кліматичних і виробничих умов з великим перепадом температури, тиску, вологості та ін. «Клас точності цих автоматичних вимірювачів

концентрації газів є невисоким та складає 10, якщо $C_{\max} \leq 10^{-1}$ об.%; 15, якщо $C_{\max} \leq 10^{-2}$ об.%; 20, якщо $C_{\max} \leq 10^{-4}$ об.%. Ці вимірювачі мають необхідне значення селективності, чутливості та відтворюваності (стабільності) результатів вимірювання, а також забезпечувати мінімальне значення часу затримки між вимірюваннями» [3].

«Автоматичні промислові вимірювальні засоби концентрації газових компонент в атмосфері повинні забезпечувати такі вимоги» [1, 3]:

- висока значення чутливості,
- вимірювання гранично-допустимого значення речовини, концентрація якої визначається;
- висока вибірковість, що дозволяє здійснювати виділення речовини, що аналізується, на рівні інших, які близькі за властивостями та побудові, концентрація домішок може бути значно вища ніж концентрація речовини, що аналізується;
- висока стабільність та надійність результатів вимірювання, значення якої не змінюється протягом тривалого часу, та залежить від складу аналізованого повітряного середовища, тиску, температури, вологості та ін.;
- взаємозамінність;
- можливість простої апроксимації статичних характеристик перетворення;
- простота та зручність під час експлуатації;
- забезпечення максимальної автоматизації під час аналізу;
- відсутність необхідності під час простого контролю та спостереження від обслуговуючого персоналу;
- здатність визначати склад аналізованої речовини у досить широкому діапазоні зміни її концентрації: від гранично-допустимих значень концентрації до максимально-можливої концентраціями під час дії різних аварій;
- безперервність аналізу та мінімальний час дії перехідного процесу;
- невисока вартість, невеликі капітальні витрати, що потрібні для отримання інформації;

- можливість отримання інформації від необхідної точки у форматі, що прийнятний для сприйняття системою автоматичного вимірювального контролю;
- зручність від централізованого обслуговування.
- досить високе значення точності вимірювальної інформації щодо зміни концентрації аналізованого компонента газової суміші.

Виконати та задовольнити всі зазначені вимоги – це досить складна задача. Ці вимоги мають взаємовиключний характер. Так, наприклад, вимога щодо високої чутливості є протиріччям щодо вимоги до високої специфічності та простоти. Також необхідність забезпечення автоматизації та безперервності аналізу суттєво суперечать вимогі щодо невисокої вартості. Для максимального задоволення цим вимогам та подолання зазначених протиріч під час розробки методів і засобів вимірювального контролю концентрації компонент, що забруднюють атмосферу використовуються сполучення різних фізичних і хімічних методів. Суперечливість характеру є основною причиною того, що автоматичні вимірювачі концентрації газових компонент розроблено не для всіх забруднювачів атмосфери. У переважній більшості випадків до останнього часу вимірювальний контроль або визначення наявності шкідливих речовин у повітрі здійснювалося під час використання засобів періодичного контролю та лабораторних експрес-методів [1, 2].

Одним комбінованим фізико-хімічним методом дуже важко забезпечити достатню величину надійності, високе значення вибіркової, чутливості, точності та відтворюваності під час дії автоматичного аналізу в умовах промисловості з безупинною експлуатацією та впливом численних дестабілізуючих факторів. У автоматичних системах вимірювального контролю необхідно застосовувати первинні чутливі елементи, які здатні реагувати на наявність шкідливих домішок, повинні бути універсальними. Кількість датчиків повинно дорівнювати числу аналізованих газових компонентів. В останні роки з'являються розробки універсальних автоматичних інформаційно-вимірювальних системи, які базуються на газовій хроматографії, мас-

спектрометрії, інтерферометрії. У США отримала розвиток методика автоматичного визначення концентрації домішок у атмосферному повітрі за допомогою лазерів.

До переваг лазерного методу можна віднести те, що він має дуже високу вибірковість та чутливість. Метод є прецизійним, за допомогою його може здійснюватися практично миттєво вимірювання концентрації різних забруднювачів у дуже широких межах. За допомогою його метода можливо здійснювати вимірювання, як конкретного типу забруднення, так і щільності забруднюючих компонентів, які визначаються уздовж шляху розповсюдження лазерного променя, довжина якого може сягати 50 км. Завдяки успіхам, що досягнуто останнім часом в створенні лазерів, які мають здатність до зміни довжини хвилі оптичного випромінювання, лазерний метод може бути у майбутньому найбільш перспективним і універсальним для вимірювального контролю компонентів газової суміші. До створення надійного та універсального вимірювача концентрації газових компонентів дуже далеко, тому науковці розробляють квазіуніверсальні вимірювачі на кілька компонентів газової суміші, ці вимірювачі мають у своєму складі загальний блок реєстрації та обробки вимірювальних даних. У США створено ряд таких квазіуніверсальних автоматичних комплексів, що мають здатність здійснювати аналіз сукупності найрозповсюджених домішок. Ці комплекси базуються на фотокolorиметричних і спектрометричних методах, проте вони не отримали широкого розповсюдження в автоматичних системах вимірювального контролю так, як мають недостатню експлуатаційну надійність.

Автоматичні вимірювальні системи необхідно будувати зі застосуванням комплексу автономних датчиків, які використовуються для детектування конкретного типу шкідливої домішки. Отже це обумовлює необхідність «ретельного обґрунтованого вибору методу вимірювання для автоматичного безперервного вимірювального контролю компонентного складу атмосфери, характеристик її окремих компонентів на базі сформульованих вище вимог до відповідної системи, що застосовується в промисловості» [1 – 3].

1.2 Аналіз методів вимірювального контролю концентрації оксиду вуглецю

За принципом дії фізико-хімічні методи та складу перетворення інформації щодо зміни концентрації вимірювального газового компоненту в електричний сигнал їх поділяються на механічні методи, магнітні, теплові, електричні, оптичні, мас-спектрометричні, абсорбційні, газові хроматографічні.

«Механічні методи, до яких відносять об'ємно-манометричні вимірювачі концентрації газів, є універсальними, вони мають високе значення вибірковості та прості під час експлуатації, але вони мають дуже низьке значення чутливості (0,1 мг/л), невисоку точність, велику величину тривалості аналізу, а також неможливість їх експлуатації під час дії вібрації та трясці» [1].

Магнітні методи, мають обмежене застосування для аналізу газів, у яких спостерігаються парамагнітні властивості, це такі гази, як O_2 , NO , NO_2 . Магнітні методи мають невисоку точність, малу величину чутливості (0,1 мг/л) та для здійснення вимірювального контролю вони не придатні.

Теплові методи. Термокондуктометричний метод характеризується безперервністю аналізу, він має необмеженість діапазону вимірювання, можливість здійснювати аналіз хімічно-інертних компонентів газової суміші, з найбільшою перевагою для вимірювання агресивних газів: Cl_2 , SO_2 , HCl , H_2S та ін. У цього методу є істотні недоліки, які ускладнюють його застосування в автоматичних системах вимірювального контролю: високе значення порогу чутливості ($10^{-1} - 10^{-2}$ мг/л) під час аналізу малих концентрацій, що перевищує санітарні норми; низька швидкодія вимірювань; нелінійність статичної характеристики перетворення; залежність зміни коефіцієнта теплопровідності від коливань швидкості газообміну, атмосферного тиску, температури газового середовища, а також від зміни струму джерела випромінювання, вібрації та ін. Принцип теплопровідності не забезпечує потрібної вибірковості та може застосовуватися тільки, якщо є різкі відмінності теплопровідності компонента газової суміші, що вимірюється, від теплопровідності інших її складових. До

переваг термokatалітичного методу можна віднести безперервність роботи, можливість здійснення автоматичної компенсації зовнішніх дестабілізуючих факторів в однокамерному датчику, відсутність складних допоміжних пристроїв, що здійснюють попередню підготовку аналізованого газового середовища за вологістю, температурою, тиском, запиленості та ін. До недоліків методу можна віднести недостатню чутливість для аналізу гранично-допустимих концентрації переважної більшості пальних газів, мале значення вибіркової, низька швидкодія та обмежений діапазон вимірювання.

«Електричні методи мають високу чутливість, величина якої складає більше 1 мг/м^3 та стабільність. У більшості іонізаційних методів необхідно здійснювати попередній хроматографічний розподіл проби. Для здійснення вибіркового аналізу, який виконується без попереднього хроматографування, найбільше поширення отримали одержали полум'яно-іонізаційний та аерозольно-іонізаційні методи» [3]. Останній є новим методом, який знаходиться в стадії формування, та є багатообіцяючим і широкооб'ємним. Зазначений метод має високу чутливість, мале значення інерційності, а також можливість здійснення виборчого вимірювального контролю великої кількості газових домішок, що мають мікроконцентраційний вміст. Системи, які базуються на цьому способі, можуть виконувати вимірювальний контроль в режимі реального часу таких токсичних речовин, як пари синильної кислоти, фтористий водень, тетраетилсвинець, фосген, галоїдовані вуглеводні з величиною чутливості 10^{-2} мг/м^3 . Полум'яно-іонізаційний спосіб застосовується тільки для визначення органічних речовин. Він може здійснювати вимірювання практично безінерційно, мати високе значення чутливості від 10^{-2} до 10^{-3} мг/м^3 до зміни низькомолекулярних речовин, з підвищенням молекулярної маси величина чутливості способу зменшується. До його недоліків можна віднести низьку величину вибіркової до окремих зміни органічних компонентів під час їх спільної присутності. У цьому випадку вимірювач концентрації газів визначає їх суму та/або концентрацію компонентів газової суміші, що аналізується. Потенціометричні та полярографічні способи

застосовуються під час визначення малих значень концентрації кисню в газових сумішах, та також озону зі вмістом 10^{-6} об.%, або (0,1 – 0,5) ppm у атмосферному повітрі. Для контролю концентрації газових компонентів полярографічним методом його застосовуються тільки сумісно з кулонометричним.

У промисловій санітарії зазвичай застосовується кулонометричний та кондуктометричний методи контролю складу газової суміші. До переваг кондуктометричного методу можна віднести «його високу чутливість, значення якої складає більше 0,05 мг/м³, простоту та надійність під час роботи інструментальних засобів, які мають відносно великі габаритні розміри» [3]. Також необхідно занести до переваг його універсальність та можливість аналізу таких газових компонентів SO₂, CO₂, Cl₂, SO₃, NH₃, HCl, S, C₂H₂, NO₂ під час застосування прямої абсорбції, а після здійснення попередньої хімічної реакції такі компоненти, як O₂, CO, H₂S, H₂, S, NO. Недоліком кондуктометричного способу є низьке значення вибірковості, тому цей спосіб використовується для аналізу бінарних або квазібінарних сумішей, а також для визначення загального забруднення повітря. Також недоліком зазначеного метода є суттєва залежність результатів вимірювання від зміни температури навколишнього середовища; необхідність використання вимірювальних схем змінного струму високої частоти (1 кГц) через виникнення похибок від поляризаційних явищ під час застосування постійного струму. Кулонометричний спосіб має високу точність вимірювання, результати вимірювання не залежать від зміни температури навколишнього середовища, тиску, вологості та інших дестабілізуючих факторів. Це дозволяє застосовувати розширений спектр титрантів та визначати досить велику кількість компонентів, що має одну базову конструкцію. Кулонометрія під час здійснення вимірювального контролю потенціалу має високе значення чутливості, величина якої складає до 10⁻³ ppm для SO₂, точність, відсутністю необхідності термостатування проби, що досліджується, гарну вибірковість, компактність конструкції, високе, у порівнянні зі фотоколориметричними та електрокондуктометричними способами швидкодію, просте апаратне оформлення, експлуатаційну надійність

та мінімальні витрати часу на обслуговування. Ці переваги дають змогу застосовувати зазначені методи для вимірювального контролю газових компонентів атмосфери під час розробки інформаційно-вимірювальних систем визначення H_2S , SO_2 , O_3 , NO , NO_2 , Cl_2 та ін [3].

Оптичні методи з абсорбційним принципом дії в ультрафіолетовій області спектра мають обмежене значення вибірконості. Більшість вимірювальних систем призначено для визначення концентрації в повітрі пари ртуті (10^{-7} об.%) та хлору. «Ультрафіолетові вимірювачі використовуються для визначення концентрації нітробензолу ($0,032 \cdot 10^{-7}$ об.%) та озону ($71 \cdot 10^{-7}$ об.%). Більше значення вибірконості має інфрачервоний спосіб вимірювання. Так, вимірювачі, що базуються на зазначеному способі мають високе значення вибірконості, високу чутливість до 10^{-4} об.% CO_2 , CO , CH_4 , C_2H_2 , H_3 . Значення швидкодії інфрачервоного способу вимірювання становить від 0,15 до 0,3 с» [3]. Цей спосіб придатний до здійснення автоматизованого вимірювального контролю, велике значення зміни вихідного сигналу під час малих приростів концентрації компоненту газового суміш обумовлюють перспективність застосовування цього типу вимірювального контролю незважаючи на складність інструментальних апаратно-програмних засобів. Радіоспектроскопічний, турбодиметричний та нефелометричний способи не отримали широкого розповсюдження для здійснення безперервного вимірювального контролю. Використання вимірювачів, що базуються на поглинанні оптичної енергії у видимій частині спектра практично обмежено. Такі пристрої застосовуються для вимірювання великих концентрацій оксидів азоту. Проте похідний фотоколориметричний спосіб отримав найбільше розповсюдження. Цей спосіб має більші переваги під час аналізу в газовій фазі: системи є менш громіздкі конструктивно, під час їх застосування не вимагається спеціальних пристроїв, які призначено для забезпечення підготовки до аналізу, також вони мають широку уніфікацію та набагато більше значення чутливості, що досягає 10 – 100 разів. До недоліків цих вимірювальних системи можна віднести велике значення похибки вимірювання

складність оптичної та механічної конструкцій. Фотоколориметричний спосіб є перспективний для вимірювального контролю мікро- та ультрамікроконцентрацій токсичних газових компонентів: NO_x , SO_2 , H_2S , NH_3 , O_3 , Cl_2 , CO , C_2H_2 , CS_2 , що підтверджується техніко-експлуатаційними характеристиками сучасних системи вимірювання концентрації газів.

Інтерферометричний спосіб використовується тільки для аналіз бінарних сумішей. Це спосіб отримав розповсюдження для лабораторних аналітичних установок, що мають високу точність вимірювання для ручних і переносних вимірювачів концентрації CH_4 та CO_2 . Для виявлення інтерферометричним способом домішок, які мають близькі спектрами, за допомогою активної фільтрації та логічних схем приводять до ускладнення конструктивних рішень. Рефрактометричний спосіб має високу точність, проте, як й інтерферометричний не володіє вибірковістю. «Рефрактометричний спосіб застосовується для вимірювального аналізу бінарних сумішей. Емісійний метод застосовується для визначення концентрацій інертних газів, що входять до складу бінарних сумішей» [1, 2].

Люмінесцентний аналіз має найбільшу чутливість та швидкодію серед усіх фізико-хімічних методів визначення та ідентифікації неорганічних і органічних речовин. Під час збереження вибіркової фотоколориметричного способу, застосування флуоресцентного способу дозволяє значно підвищити значення чутливості. Проте люмінесцентний аналіз здійснюється з використанням лабораторних пристроїв для автоматичного вимірювального контролю. Одним з різновидів люмінесцентного спосіб є хемілюмінесцентний, який не має вибіркової.

У порівнянні трьох лазерних методів, які базуються на комбінаційному та резонансному розсіюванні (КР і РР), а також резонансному поглинанні (РП), стосовно до вимірювальних задач визначення концентрації газових компонентів, чутливість схем КР на молекулярних інфрачервоних переходах є недостатньо високою для визначення речовин, що розсіяні в атмосфері (від 10^{-5} до 10^{-6} об.%) та одночасного забезпечує високе значення дозволу за

глибиною. Цей спосіб отримав розповсюджене застосування для аналізу високих концентрацій газових компонентів димових газів промислових підприємств. Застосування РР пов'язано з дискретним налаштуванням лазера до частоти електронного переходу різних молекул компонентів газової суміші, що розташовано в ультрафіолетовій області. Для цієї області ще не розроблено та створено лазери, що мають високу потужність випромінювання та здатній до налаштування на необхідні частоти. У цій області спектра пропускання оптичного випромінювання обмежується втратами випромінювання на поглинання та розсіювання. За допомогою способу РР можна визначати концентрацію пари таких домішок, як Zn, Cd, Na, Hg та ін. у діапазоні їх зміни від 10^{-6} до 10^{-9} об.%, а також молекулярних з'єднань речовини SO₂, CO, NO₂, C₆H₆ та ін. у діапазоні зміни від 10^{-6} до 10^{-9} об.%. Спосіб РР дозволяє здійснювати вимірювання повної інтегральної щільності речовин уздовж шляху розповсюдження оптичного випромінювання. До переваги РР можна віднести відносну простоту реалізації, високе значення чутливості вимірювального контролю гранично-допустимої концентрації будь-яких компонентів, а також мінімальне значення потужності оптичного випромінювання, що збуджує. До недоліків РР можна віднести необхідність застосування для реєстрації інфрачервоного випромінювання, яке розповсюджується від передавача до приймача, або від зворотного відбивача. «Для реалізації КР та РР необхідно застосовувати дорогі та складні оптичні системи сумісно з пристроями обробки даних. Схеми, що базуються на атмосферному поглинанні зі застосуванням РР, є менш складними та більш дешевими, для їх реалізації потрібні лазери, що мають невелику потужність. Так собівартість реалізації способу знижується, коли потрібні компоненти отримують більш широке розповсюдження, тому лазерний спосіб зі застосуванням РР є перспективним для автоматичного вимірювального контролю концентрації забруднюючих компонентів» [1, 3].

Мас-спектрометричні методи мають такі переваги, як вибірковість, прецизійність, а також висока чутливість аналізу газів, рідких і твердих аерозолів, що здатні переходити до газоподібного стану під час дії тиску від 30

до 40 мм рт. ст.. Усе це в сукупності обумовлює універсальність зазначеного методу. Застосування систем на базі мас-спектрометрів для безперервного вимірювального контролю концентрації газових компонент у промислових умовах обмежується складністю технічної реалізації та громіздкістю розроблених систем. Зазначені системи вимагають наявності висококваліфікованого обслуговуючого персоналу. До переваг методу можна віднести повну автоматизацію вимірювального контролю, а також спрощене налаштування системи на комплекс компонентів газової суміші.

Абсорбційні методи в переважній їх більшості мають такий недолік, як періодичність аналізу, який відсутній у теплодинамічних системах. Газові хроматографи є найбільш універсальні аналітичні системи, які призначено для вимірювання складу газової суміші, що складається з багатьох компонентів. Метод має порівняну простоту, а також можливість автоматизації вимірювань, що робить його найбільш перспективним для здійснення вимірювального контролю компонентів газової суміші. Великий потенціал можливостей має комбінація мас-спектрометричного та хроматографічного методів вимірювання.

Вимірювання запиленості повітря є однією з найважчих задач, чим аналіз концентрації газових компонентів. Результат вимірювання залежить від розподілу часток за величиною, зміною хімічного складу та концентрації. Для створення автоматичних вимірювачів концентрації пилу необхідно застосування акустичного, аеродинамічного, оптичного, електричного, радіоактивного та вагового методів.

«Аеродинамічний метод призначено для вимірювання концентрації пилу, значення якої більш 500 мг/м^3 » [3] Це метод є найкращий для безперервного вимірювального контролю запиленості димових газів. Акустичний метод має невисоку точність тому, що загасання звуку залежить від зміни багатьох факторів середовища, що контролюється, а саме: температури, тиску, вологості, в'язкості та ін. Застосування фотометричного способу забезпечує високе значення чутливості аналізу під час дії невеликих швидкостей руху середовища від 0,05 до 0,5 м/с. Цей спосіб має достатню значення точності, стабільності та

надійність результатів вимірювання. Здатність щодо поглинання аерозолів має експоненціальну залежить від зміни концентрації, дисперсності та виду пилу. Швидкодія, безперервність вимірювання та безконтактність сприяють широкому розповсюдженню інструментальних засобів, на яких базується цей спосіб. Радіоактивний спосіб може здійснити аналіз пилу в діапазоні зміни концентрації від 0 до 50 мг/м^3 з величиною відносної похибки $\pm 5 \%$. Реалізація метода має складне конструктивне рішення, що ускладнює застосовування. Проте високе значення чутливості радіоактивного методу обумовлює його перспективність вимірювального контролю забруднювачів атмосферного повітря. За допомогою електричних методів можна визначати запиленість від $0,2$ до 100 мг/м^3 та вище. Якщо пил не має природного заряду, то є можливість створення об'ємного змінного заряду в аерозолі за допомогою електродів. Пил може електризуватися з конструкцією пристрою під час дії високої швидкості газового потоку. Останній метод застосовується «в контактено-електричних датчиках для здійснення аналізу запиленості повітря та димових газів в діапазоні зміни від $0,002$ до 10 г/м^3 » [3].

Ваговий метод має найбільше розповсюдження в лабораторній практиці визначення запиленості повітря але він є непридатним для автоматичних систем вимірювання. Застосування пристроїв, що базуються на автоматичних вага, також є неефективним через наявність дискретності операцій визначення концентрації пилу. Більше розповсюдження отримав гравіметричний метод, який базується на вимірюванні частоти коливань стрічки п'єзакристалу, що обумовлено осіданням часток пилу на поверхню кристала. Цей електростатичний спосіб генерування коливань та вимірювання їх частоти дозволяють здійснювати автоматизацію процесу вимірювання, а також виконувати реєстрацію та дистанційну передачу даних.

Усі наведені методи знайшли застосування під час розробки газо-аналітичних вимірювачів концентрації компонентів газової суміші. Виконаємо аналіз застосування цих методів для вимірювального контролю концентрації оксиду вуглецю та відзначимо найбільш важливі їх характеристики.

1.3 Аналіз засобів вимірювального контролю концентрації оксиду вуглецю

Фотоколориметричні вимірювачі концентрації газів базуються на виборчих кольорових реакціях між реактивом-індикатором, який знаходиться в розчині, на стрічці або спеціальному порошку та компоненті газової суміші, що аналізується. Мірою концентрації компонента є зміна інтенсивності фарбування продуктів реакції, які утворюються. Фотоколориметричні вимірювачі концентрації газів мають досить високе значення чутливості та вибіркової, що може бути досягнуто вибором характерного хімічного реактиву, який застосовується для виготовлення індикаторного засобу.

До переваг фотоколориметричного методу можна віднести можливість створення на його базі універсальних конструкцій. Цей вимірювач разом з індикаторними розчинами може застосовуватися для ідентифікації різних шкідливих речовин. Визначальною під час цього є наявність фотоколориметричної методики для здійснення автоматичного аналізу, яка відповідає таким вимогам: мінімальний час утворення пофарбованого з'єднання, стійкість реактивів у часі, специфічність та чутливість реакції, невелике число реактивів, відсутність складних операцій, невисока токсичність реактивів, пожежа- та вибухонебезпечність, нескладність виготовлення розчинів.

За принципом дії фотоколориметричні вимірювачі концентрації газів розділяють на три типи: рідинні, стрічкові та порошкові. У рідинних вимірювачах концентрації газів має місце реакція в розчині, а концентрацію компонента, що аналізується, вимірюють за поглинанням оптичного випромінювання в розчину. До переваг вимірювачів цього типу можна віднести високу точність вимірювання та можливість застосовувати індикаторні розчини, які містять концентровані кислоти, це є важливою умовою для вимірювального контролю малореакційних речовин під час дії звичайних умов. Проте, наявність механічних пристроїв у складі цих вимірювачів, які

здійснюють перекачування та дозування газів і рідини, ускладнює їх конструкцію та громіздкість, саме це перешкоджає їх широкому застосуванню під час практичного використання.

У автоматичних вимірювачах концентрації газів стрічкового типу хімічна реакція відбувається на паперовій або текстильній стрічці, що просочено необхідним реагентами перед здійсненням фотоколориметрування. Концентрацію речовини, яка досліджується, визначають за ослабленням потоку оптичного випромінювання, який відбитий від ділянки індикаторної стрічки, яка змінила колір під час аналізу.

У вимірювачі концентрації газів типу «Сирен» як первинний вимірювальний перетворювач застосовується індикаторний порошок. Цей вимірювач базується на принципі багаторазового застосування фарбування поверхні індикаторного порошку, що здійснюється під дією газового компоненту суміші, який міститься в повітрі або пари хімічної речовини. Цей вимірювач є надійним під час експлуатації, простий у застосуванні та може використовуватися в системах автоматичного контролю концентрації газів [3].

Електрохімічні вимірювачі концентрації газових компонентів базуються на використанні кулонометричних та кондуктометричних методів. Можливості кулонометричних вимірювачів дозволяють мати декілька діапазонів вимірювання, які охоплюють значення гранично-допустимої концентрації в атмосферному повітрі, а також під час значного перевищення гранично-допустимих концентрацій.

«Стаціонарний вимірювач концентрації газів типу «Палладій-М», який заснований на основі кулонометричного метода, призначено для автоматичного вимірювального контролю оксиду вуглецю у повітрі промислових підприємств. Вимірювач виконано в у шести варіантах в залежності від кількості каналів вимірювання та захищеності від впливу зміни факторів навколишнього середовища» [3]. Цей вимірювач використовується в стаціонарних умовах та пересувних лабораторіях. Принцип дії цього вимірювача базується на методі потенціостатичної амперметрії, який заснований на вимірюванні величини

струму електрохімічного осередку.

Іонізаційні вимірювачі концентрації газів засновано на залежності зміни іонного струму, який виникає під час іонізації досліджуваного газу, від вмісту компонента в контрольованій газовій суміші. З відомих способів іонізації газів, а саме іонізація полум'ям, радіоактивне випромінювання та опромінення короткохвильовим світлом, під час розробки вимірювачів концентрації газів зазвичай застосовують іонізацію полум'ям та радіоактивне випромінювання. До переваг іонізаційного методу можна віднести низький поріг чутливості, широкий діапазон вимірювання концентрації, достатня висока стабільність та надійність роботи, а також швидкодія та можливість розробки датчиків для систем газового контролю, які мають уніфіковані електричні сигнали. До основного недоліку полум'яно-іонізаційних вимірювачів концентрації газів можна віднести їх низьке значення вибіркості до окремих органічних компонентів під час їх спільної присутності в аналізованій газовій суміші. Зі застосуванням полум'яно-іонізаційних вимірювачів визначають суму або концентрацію компонентів, у яких є переважна іонізаційна ефективність. Для підвищення специфічності аналізу до складу цих пристроїв входить засіб для переведення контрольованого газового компонента до його аерозольної фази.

Хемілюмінесцентні та флуоресцентні вимірювачі концентрації газових компонентів базуються на вимірюванні інтенсивності люмінесценції продуктів хімічної реакції, яку обумовлено взаємодією з реагентом. Флуоресцентні вимірювачі базуються на вимірюванні інтенсивності флуоресценції, що обумовлено дією ультрафіолетового випромінювання на компонент.

Лазерний вимірювач концентрації газових компонентів призначено для вимірювання концентрації метану в атмосферному повітрі. Цей вимірювач входить до складу пересувних лабораторій, які використовуються для визначення оперативної обстановки та обстеження трас міських і магістральних газопроводів для виявлення витоку природного газу. Принцип дії цих вимірювачів базується на лазерному прямому абсорбційному методі вимірювання, який полягає в резонансному поглинанні оптичного

випромінювання метану на довжині хвилі 3,39 мкм. Як джерело випромінювання застосовується газовий лазер, у якого частота оптичного випромінювання дорівнює частоті резонансного поглинання випромінювання метаном. Це забезпечує високу величину вибіркової та чутливості процесу вимірювання концентрації газового компонента суміші.

Оптико-акустичні вимірювачі концентрації газових компонентів використовуються для визначення складу відпрацьованих газів автотранспорту під час експлуатації. Ультрамикроконцентрацію оксиду вуглецю, яка міститься в атмосферному повітрі, також можна визначити спектроабсорбційним методом вимірювання, який використовує смуги поглинання оксиду вуглецю в інфрачервоній області спектра 4,66 мкм. На цій довжині хвилі як приймачі оптичного випромінювання застосовуються герметичні камери, які мають конденсаторні мікрофони, що заповнено газовою сумішшю. Оптико-акустичний метод базується на такому фізичному явищі. Якщо газ, який має змогу поглинати інфрачервоне оптичне випромінювання, розмістити в закритий об'єм, то під час впливу інфрачервоного випромінювання, газ нагрівається за деякий проміжок часу до температури, величина якої визначається умовами теплопередачі. Також сумісно зі підвищенням температури зростає тиск газу. Якщо здійснювати переривання потоку оптичного випромінювання за допомогою обтюратора з деякою частотою, то газ у закритому об'ємі має періодичність нагрівання та охолодження. Отже, виникають коливання температури й тиску газу, зміна яких може сприйматися чутливим елементом вимірювача концентрації газу.

«Дисперсійні або «монохроматизуючі» пристрої практично не застосовуються для вимірювального контролю процесів у промислових умовах. У цих умовах зазвичай застосовуються недисперсні пристрої, які не використовують спектральне розкладання. Селективність цих пристроїв дещо менша, проте під час промислового застосування вони мають ряд переваг, до яких відносять підвищене значення чутливості, надійності та простоту, а також менші експлуатаційні витрати» [3].

Під час застосування однопроменевого варіанту вимірювача, оптичне випромінювання від джерела проходить через кювету, що має аналізоване газове середовище. Послідовно через два фільтри, що обертаються, здійснюється зіставлення за допомогою детектора поглинання для двох довжин хвиль. Одна довжина хвилі відповідає максимуму поглинання для аналізованого газу, а друга – мінімальному поглинанню, яка сприймається як опорна. Вимірювачі на базі двопроменевої схеми є більш розповсюджені. Використовуються вимірювачі концентрації газів двох типів: вимірювачі з позитивним фільтром, структуру якого наведено на рис. 1.1 та вимірювачі з негативним фільтром (див. рис. 1.2) [3].

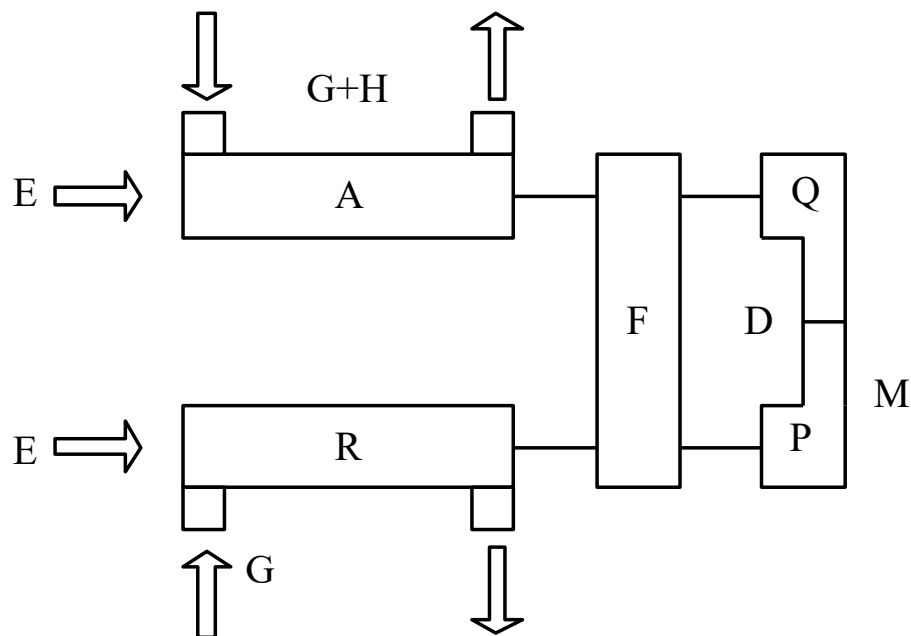


Рисунок 1.1 – Схема реалізації інфрачервоного бездисперсійного двопроменевого вимірювача з позитивним фільтром

Вимірювач з позитивним фільтром (див. рис. 1.1) має в своєму складі робочу кювету A, через яку здійснюється пропускання аналізованої газової суміші. Газ H, який поглинається в інфрачервоній області спектра, та газ G, який не поглинається в цій області. Також до складу вимірювача входить кювета порівняння R, яка має непоглинаючий газ G. Зазначені кювети виготовлено з міді або зі скла, що позолочено або посріблено зсередини. Ці

кювети виготовлено з матеріалів: кварц, слюда, LiF , Ca_2F та ін., що є прозорими для інфрачервоного випромінювання [3].

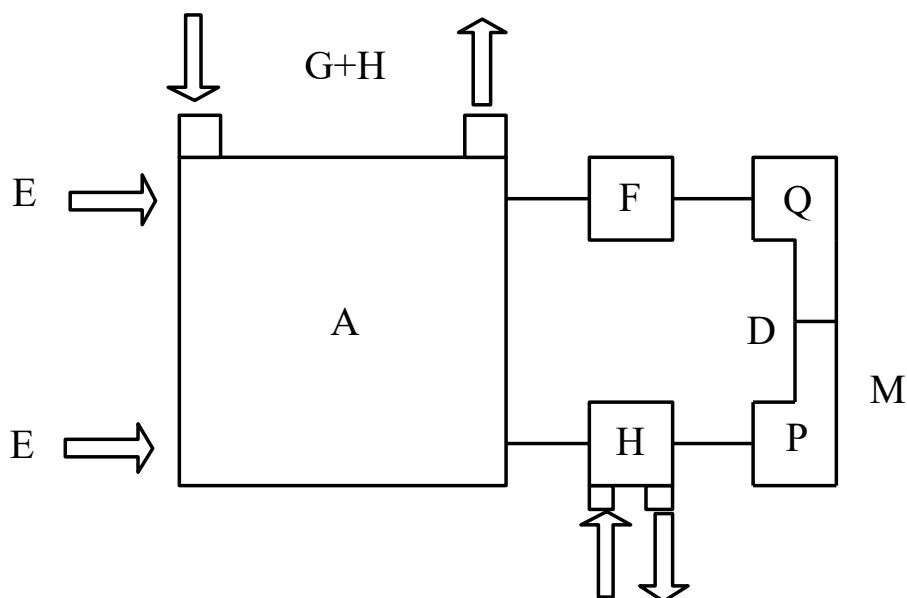


Рисунок 1.2 – Схема реалізації інфрачервоного бездисперсійного двопроменевого вимірювача з негативним фільтром

Детектор D, який працює за диференціальною схемою, складається з двох камер: P і Q, які заповнено газом H та розділено мембраною M. Газ H, що знаходиться в камері P, поглинає інфрачервоне випромінювання на визначеній довжині хвиль. Газ, що знаходиться у камері Q, поглинає випромінювання на цій довжині хвиль тим менше, чим більше частка газу H у суміші, який пропускається через кювету A. Нагрівання та зміна тиску газу H у секціях P і Q детектора вимірювача будуть розрізнятися, чим більше концентрація газу H у суміші (див. рис. 1.1 з позитивним фільтром). Якщо газова суміш, що аналізується, має компоненти в своєму складі, смуги яких перекриваються зі смугами аналізованого газу, то використовується компенсаційна кювета F, через яку проходять два оптичних промені. Отже, забезпечується режим, під час якого зміна концентрації газів не впливає на процес вимірювання.

У вимірювачах концентрації газових компонентів з негативним фільтром, схему якого наведено на рис. 1.2, випромінювання від джерела направляється

до кювети А. Через цю кювету продувають аналізовану газову суміш ($G + H$), а потім одночасно з цим через кювету N, яку заповнено аналізованим газом H, і через компенсаційну кювету F, що заповнено газом та включено за диференціальною схемою. Різниця тисків між секціями P і Q детектора вимірювача буде зменшуватися зі збільшенням концентрації газу H у суміші для схеми з негативним фільтром (див. рис. 1.2).

1.4 Напрямок та завдання досліджень, що виконуються в роботі

Метою роботи є підвищення точності та швидкодії інформаційно-вимірювальних систем контролю концентрації оксиду вуглецю. Для досягнення зазначеної мети в дослідженні представлені такі задачі:

- виконати аналіз тенденцій та специфіки розвитку інформаційно-вимірювальних систем концентрації газів, що забруднюють атмосферу;
- розробити математичну модель каналу вимірювання концентрації оксиду вуглецю;
- виконати дослідження метрологічних характеристик розробленого вимірювача концентрації оксиду вуглецю;
- обґрунтувати та розробити структуру оптико-акустичної інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КАНАЛУ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ

2.1 Математична модель у спектральному діапазоні поглинання оптичного випромінювання оксидом вуглецю

«Спосіб, на якому базується система, що розробляється, заснований на здатності газових компонентів атмосфери вибірково поглинати інфрачервоне випромінювання» [3]. Цей спосіб відноситься до бездисперсійних методів абсорбційної спектроскопії. У відповідності з експериментальних даних щодо молекулярного поглинання спектр оксиду вуглецю є складною структурою. Перетин поглинання спектру оксиду вуглецю в інфрачервоній області наведено на рис. 2.1. Він отриманий під час застосування високої роздільної здатності вимірювача. Цей спектр має спектральні смуги, кожна з яких визначається електронно-коливально-обертальні компонентною та їх комбінаційними складовими. Зазначені складові мають відмінне місце в спектральній області та різну інтенсивність поглинання [3 – 6].

см²/молекула



Рисунок 2.1 – Спектральне представлення поглинання інфрачервоного випромінювання оксидом вуглецю

«Максимальна інтенсивність коливально-обертальної смуги перетину поглинання оптичного випромінювання оксидом вуглецю знаходиться в області, яка має центр на довжині хвилі випромінювання $\lambda_0 = 4,67$ мкм,

графічне представлення якої наведено на рис. 2.2» [5, 6, 7].

см²/молекула

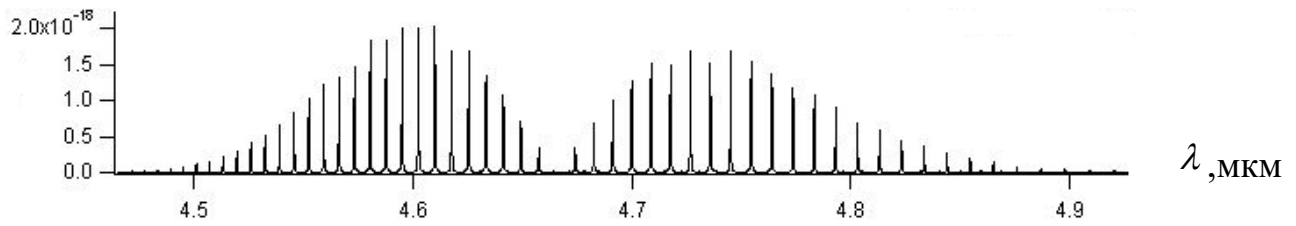


Рисунок 2.2 – Спектр поглинання інфрачервоного випромінювання оксидом вуглецю в діапазоні довжин хвиль від 4,47 до 4,92 мкм

Для інфрачервоної області мають місце коливально-обертальні смуги поглинання, що є послідовностями ліній поглинання. Контур кожної з цих ліній обумовлено міжмолекулярними зіткненням та математично може бути представлено такою формулою [3, 8, 9]:

$$KCO_i(\lambda) = \frac{a\lambda_i}{\pi} \cdot \frac{\Delta\lambda_i}{(\lambda - \lambda_{0i})^2 + \Delta\lambda_i^2}, \quad (2.1)$$

де λ_{0i} – центр кожної з ліній поглинання спектру; $a\lambda_i = \int_0^\infty KCO_i(\lambda) d\lambda$ – інтегральна інтенсивність кожної з ліній спектру поглинання; $\Delta\lambda_i$ – «напівширина обертальної лінії поглинання інфрачервоного випромінювання» [8, 9].

«Спектр є послідовність ліній поглинання. Контр кожної з ліній є результатом зіткнення молекул» [8]. Спектр описується як коефіцієнт поглинання $K(\lambda)$ смуги, що визначається як сума коефіцієнтів поглинання кожної окремої лінії поглинання [8, 9, 10]:

$$KCO(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} KCO_i(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a\lambda_i}{\pi} \cdot \frac{\Delta\lambda_i}{(\lambda - \lambda_{0i})^2 + \Delta\lambda_i^2}. \quad (2.2)$$

З аналізу спектру, що наведено на рис. 3.2 можна зробити висновок, що перетин поглинання для ліній має максимальне значення інтенсивності в області 4,67 мкм, ця величина становить приблизно $3 \cdot 10^{-18}$ см²/молекула. «Для розрахунку значення інтегральної інтенсивності лінії цю величину необхідно помножити на число Авогадро ($6,0221415 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – це кількість атомів, молекул або іонів, яке знаходиться в 1 молі речовини)». Отже, величина інтегральної інтенсивності поглинання визначається за формулою [9,10]:

$$a\lambda_i = KCO(\lambda_i = \lambda_{0i}) \cdot \pi \cdot \Delta\lambda_i \cdot N_A, \left[\frac{\text{см}}{\text{моль}} \right]. \quad (2.3)$$

«Під час розрахунків застосовувалась модель смуги поглинання, в якій довжина між центрами ліній однакова, також лінії мають однакову ширину напівширину δ_λ » [8, 10]. Поглинання оптичного випромінювання описано законом Бугера-Ламберта-Бера, що пов'язує величину поглинання зразка з його довжиною, а також “концентрацією газового компонента суміші, що досліджується, та математично представляється такою залежністю» [11 – 13]:

$$-\ln(I / I_0) = \ln(I / I_0) = KCO(\lambda) \cdot C_{CO} \cdot l = D(C_{CO}, l, \lambda), \quad (2.4)$$

де $KCO(\lambda)$ – «коефіцієнт поглинання оптичного випромінювання газовим компонентом, концентрація якого вимірюється»; I – інтенсивність оптичного випромінювання, що виходить з вимірювального каналу системи; I_0 – інтенсивність оптичного випромінювання, що надходить до вимірювального каналу системи; C_{CO} – концентрація газової компоненти суміші, що поглинає оптичне випромінювання; $\ln(I_0 / I)$ – оптична щільність речовини, що знаходиться у вимірювальному каналі системи D ; l – довжина траси оптичного каналу вимірювальної системи, значення якої дорівнює 10 см.

Під час вимірювання концентрації оксиду вуглецю C_{CO} , об.о%

застосовується формула, яка пов'язує об'ємну концентрацію вимірювального компонента суміші з молярною концентрацією C_M , моль/см³ [8]:

$$C_M(C_{CO}, T, P) = \frac{C_{CO} \cdot P}{100 \cdot R \cdot T} \cdot 10^{-6} = \frac{16,04 \cdot 10^{-8} \cdot C_{CO} \cdot P}{T}, \quad (2.5)$$

де R – універсальна газова постійна, Дж/(моль·К); P – тиск аналізованої газової суміші, Па; T – абсолютна величина температури газової суміші, що аналізується, К.

Отже, «функціональна залежність оптичної щільності під час вимірювання концентрації CO можна представити співвідношенням» [8]:

$$D(C_{CO}, l, \lambda, T, P) = K_{CO}(\lambda) \cdot C_M(C_{CO}, T, P) \cdot l. \quad (2.6)$$

Математичний опис коефіцієнта передачі оптичного каналу K_{OK} представлено такою функціональною залежністю:

$$K_{OK}(C_{CO}, l, \lambda, T, P) = e^{-D(C_{CO}, l, \lambda, T, P)}. \quad (2.7)$$

2.2 Математична модель джерела випромінювання в оптичному діапазоні

З аналіз спектру поглинання оптичного випромінювання оксидом вуглецю можна зробити висновок, що максимальна інтенсивність відповідає довжині хвилі 4,67 мкм. Отже, як джерело оптичного випромінювання використовується світловипромінюючий діод типу LED46, який має центральну довжину хвилі $\lambda_{0LED} = 4,6$ мкм. Цей світлодіод застосовується як джерело інфрачервоного випромінювання з центральною довжиною хвилі 4,6 мкм. LED46 має такі електричні та випромінюючі параметри:

- величина повної потужності випромінювання
під час дії $I_{PP} = 100$ мА, мВт не менше 0,2;
- значення прямої постійної напруга, В не більше 1,7;
- зміна довжини хвилі випромінювання
в максимумі спектру, мкм від 4,4 до 4,8;
- ширина діаграми спрямованості, що визначається на рівні 0,5 25;
- час зростання імпульсу оптичного випромінювання,
що визначається між рівнями 0,1 та 0,9, нс 50;
- час зменшення імпульсу оптичного випромінювання,
що визначається між рівнями 0,9 і 0,1, нс 60;
- максимальне значення прямого постійного струму, А 1;
- зміна температура навколишнього середовища, С від – 25 до + 40.

Фотографія зовнішнього вигляду та габарити світлодіода типу LED46 наведено на рис. 2.3 [6]:

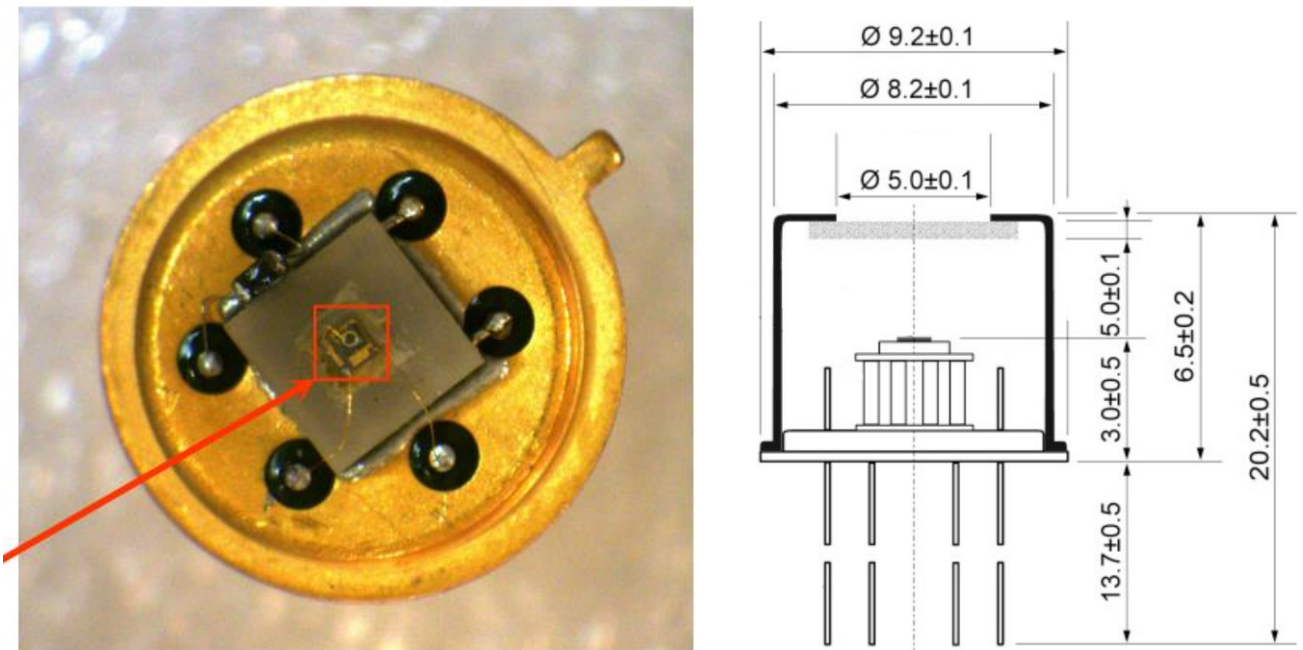


Рисунок 2.3 – Фотографія зовнішнього вигляду та габарити світлодіода типу LED46

«Математичний опис нормованої спектральної характеристика зміни потужності оптичного випромінювання світлодіода» типу LED46 (див. рис. 2.4) представлено такою залежністю [8, 13]:

$$s(\lambda) = e^{-r_{\lambda}^2 \cdot (\lambda - \lambda_0)^2}, \quad (2.8)$$

де $\lambda_0 = 4,60 \text{ мкм}$ та $r_{\lambda} = 3,20 \text{ мкм}^{-1}$

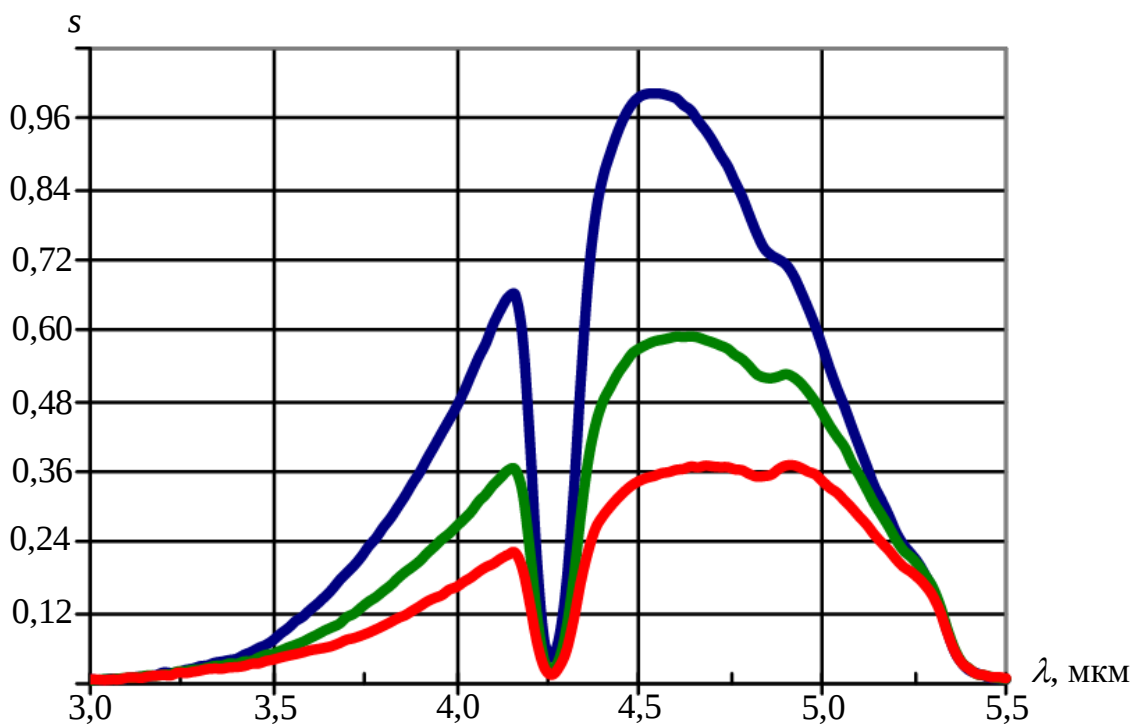


Рисунок 2.4 – Нормована спектральна характеристика оптичної потужності випромінювання світлодіода типу LED46

Параметри «спектральної характеристики оптичної потужності випромінювання визначаються» з таких умов [14, 15]:

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_{-\infty}^{+\infty} S_0 \cdot s(\lambda) d\lambda = \int_{-\infty}^{+\infty} S_0 \cdot e^{-r_{\lambda}^2 \cdot (\lambda - \lambda_0)^2} d\lambda = \\ &= S_0 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-r_{\lambda}^2 \cdot (\lambda - \lambda_0)^2} d\lambda = S_0 \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot r_{\lambda}}; \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$S_0 = \frac{2 \cdot r_\lambda \cdot \Phi}{\sqrt{\pi}} = \frac{2 \cdot 3,20 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\pi}} = 0,361 \text{ мВт} \cdot \text{мкм}^{-1}. \quad (2.10)$$

«Спектральна щільність оптичної потужності вихідного сигналу світлодіода» [15 – 17] типу LED46 наведено на рис. 2.5.

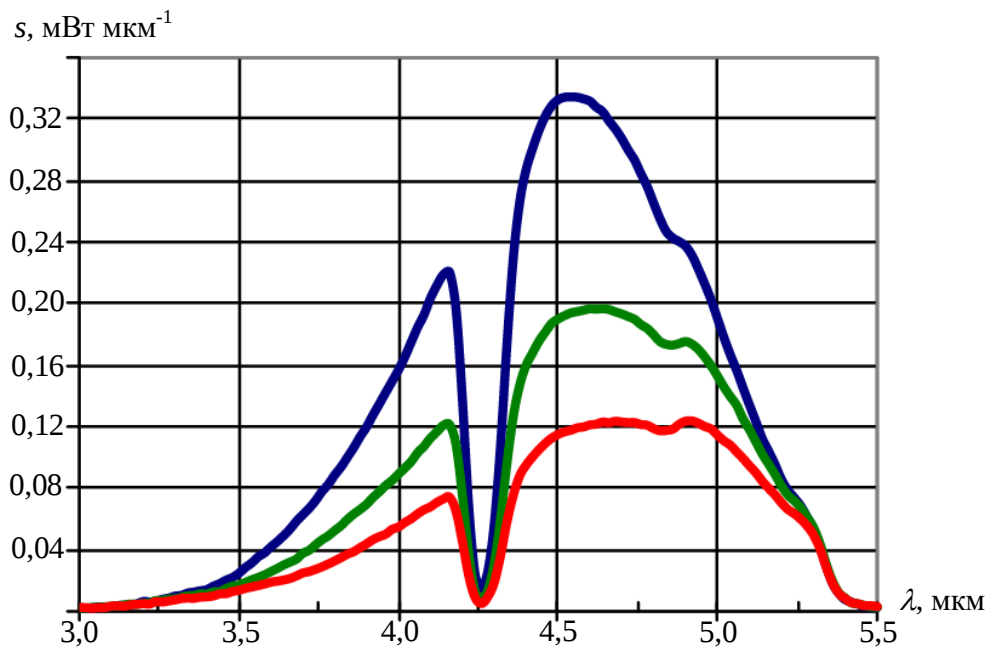


Рисунок 2.5 – Спектральна щільність оптичної потужності вихідного сигналу світлодіода типу LED46

2.3 Математична модель оптичної неоднорідності в каналі вимірювання оксиду вуглецю

Оптичну неоднорідність вимірювального каналу системи обумовлено використанням матеріалів, які мають різні властивості. Величину оптичної неоднорідності можна розрахувати через коефіцієнт заломлення оптичного випромінювання. «Втрати оптичного випромінювання на межі розділу та в середовищах, що мають різні коефіцієнти заломлення, визначаються через коефіцієнти пропускання та віддзеркалення», розсіювання та поглинання оптичного випромінювання в цих середовищах [14 – 15].

Як середовища в цьому вимірювачі є оптичні лінзи, що виготовлено з специфічних матеріалів, а саме з синтетичних і природних кристалів, спеціальних сортів скла. «Ці лінзи є дуже тонкими, їх товщина та діаметр набагато менші за фокусні відстані. Тому втратами під час поглинання та розсіювання на лінзах можна знехтувати. Та сама причина лежить в основі того, що потоки випромінювання потраплять до межі розділу середовищ за нормаллю до поверхні розділу. Під час дії малих кутів падіння оптичного променя на межу розділу, величина коефіцієнта віддзеркалення практично не змінюється. Тому з малим значенням відхилення кута падіння на межу розділу, що обумовлено кривизною цієї лінзи, практично не впливає на величину коефіцієнта віддзеркалення» [15].

Значення коефіцієнтів віддзеркалення (R) та пропускання (T) на «межі розділу двох середовищ можна розрахувати на базі коефіцієнтів заломлення оптичного випромінювання» в цих середовищах [14, 15]. Якщо оптичний промінь падає за нормаллю, то значення коефіцієнтів віддзеркалення (R) та пропускання (T):

$$R_{1,2} = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}; \quad (2.11)$$

$$T_{1,2} = 1 - R_{1,2} = \frac{(n_2 + n_1)^2 - (n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} = \frac{4 \cdot n_1 \cdot n_2}{(n_2 + n_1)^2}. \quad (2.12)$$

Під час чергування меж розділу «коефіцієнт пропускання оптичної системи розраховується за таким співвідношенням» [14, 15]:

$$T_{1,N} = \prod_{i=1}^{N-1} T_{i,i+1}. \quad (2.13)$$

Виконаємо розрахунок значення коефіцієнта пропускання оптичного каналу вимірювальної системи, який залежить від оптичних властивостей матеріалу, так зміну значення показника заломлення сапфіра наведено на рис. 2.6.

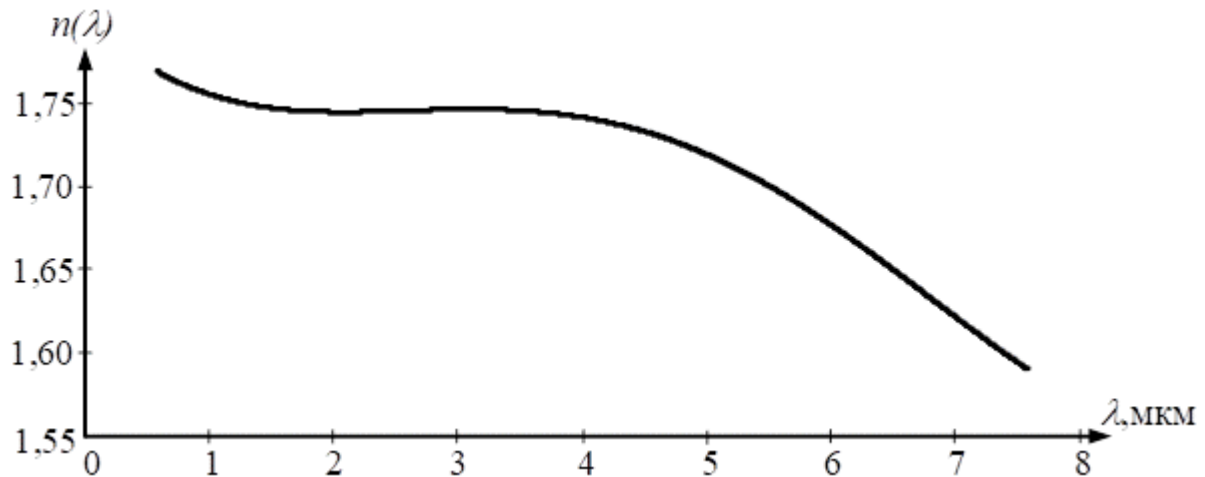


Рисунок 2.6 – Зміна показника заломлення сапфіра

Оптична система має в своєму складі дві лінзи, що розташовані на вікнах кювети. Величину загального коефіцієнта пропускання можна розрахувати на основі такої формули:

$$T_{\text{лінзи}} = T_{\text{повітря, сапфір}} \cdot T_{\text{сапфір, повітря}} \cdot T_{\text{повітря, сапфір}} \cdot T_{\text{сапфір, повітря}} = T_{\text{повітря, сапфір}}^4 \quad (2.14)$$

Зміна значення коефіцієнта пропускання оптичного випромінювання лінзами в залежності від зміни довжин хвиль випромінювання наведено на рис. 2.7.

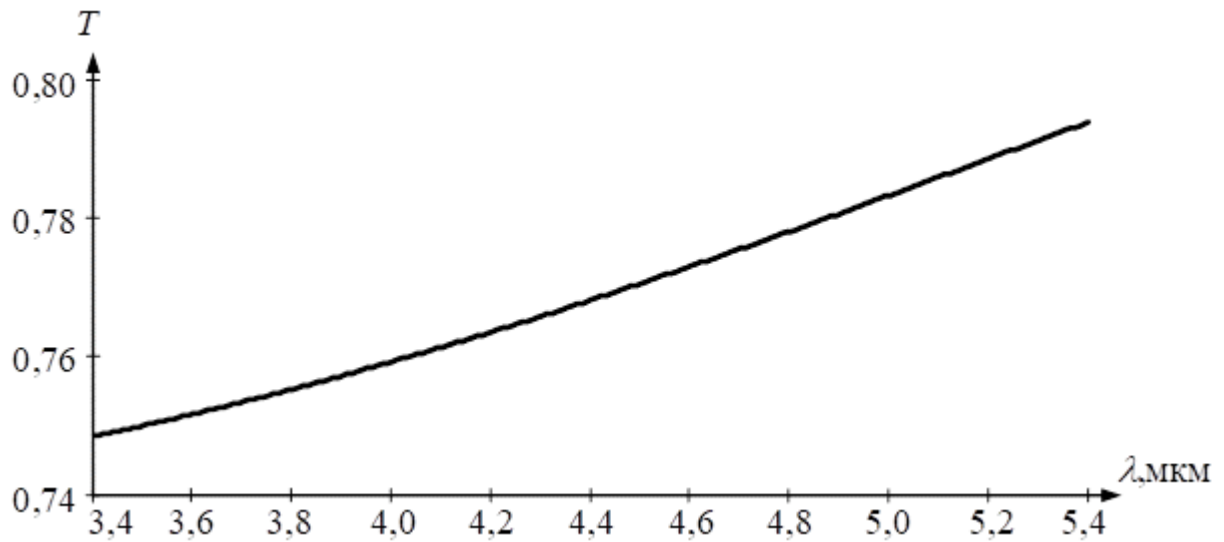


Рисунок 2.7 – Зміна значення коефіцієнта пропускання оптичного випромінювання під час зміни довжин хвиль

2.4 Математична модель формування вхідного сигналу оптичного вимірювача концентрації оксиду вуглецю

Оптичний потік створюється джерелом інфрачервоного випромінювання та спрямовано до оптичного каналу. Цей потік відіграє роль вхідного сигналу оптичного вимірювального каналу концентрації оксиду вуглецю. Оптичний потік $\Phi(C_{CO}, l, \lambda, T, P) \sim I(C_{CO}, l, \lambda, T, P)$, який пройшов через вимірювальний канал з аналізованою газовою сумішшю, є вихідним сигналом оптичного каналу вимірювача. У цьому «сигналі має місце інформація щодо зміни концентрації оксиду вуглецю. Спектральна щільність оптичної потужності вихідного сигналу випромінювача може бути описано такою функціональною залежністю» [11, 15]:

$$S_{outOC}(C_{CO}, l, \lambda, T, P) = S_{inOC}(\lambda) \cdot KCO_{OK}(C_{CO}, l, \lambda, T, P), \quad (2.15)$$

де $S_{inOC}(\lambda)$ – спектральна щільність оптичної потужності вхідного сигналу оптичного випромінювача.

Функціональні залежності зміни спектральної щільності оптичних потоків випромінювання застосовуються під час побудови спектрів характеристик вхідного та вихідного сигналів оптичного каналу вимірювача. Інформація щодо зміни концентрації оксиду вуглецю знаходиться в зміні форми спектру вихідного сигналу оптичного каналу вимірювача. «Як вхідна величин всіх оптичний приймачів є не окремі спектральні складові, а потік випромінювання. Величина вихідного сигналу фотоприймача оптичного випромінювання є пропорційною інтегральній характеристиці вихідного сигналу оптичного каналу вимірювача» [11, 15]:

$$\Phi_{outOC}(C_{CO}, l, \lambda, T, P) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{outOC}(C_{CO}, l, \lambda, T, P) d\lambda. \quad (2.16)$$

Графік зміни вихідного потоку оптичного каналу вимірювача в залежності від зміни концентрації оксиду вуглецю, якщо довжина оптичного каналу становить $l = 10$ см, наведено на рис. 2.8.

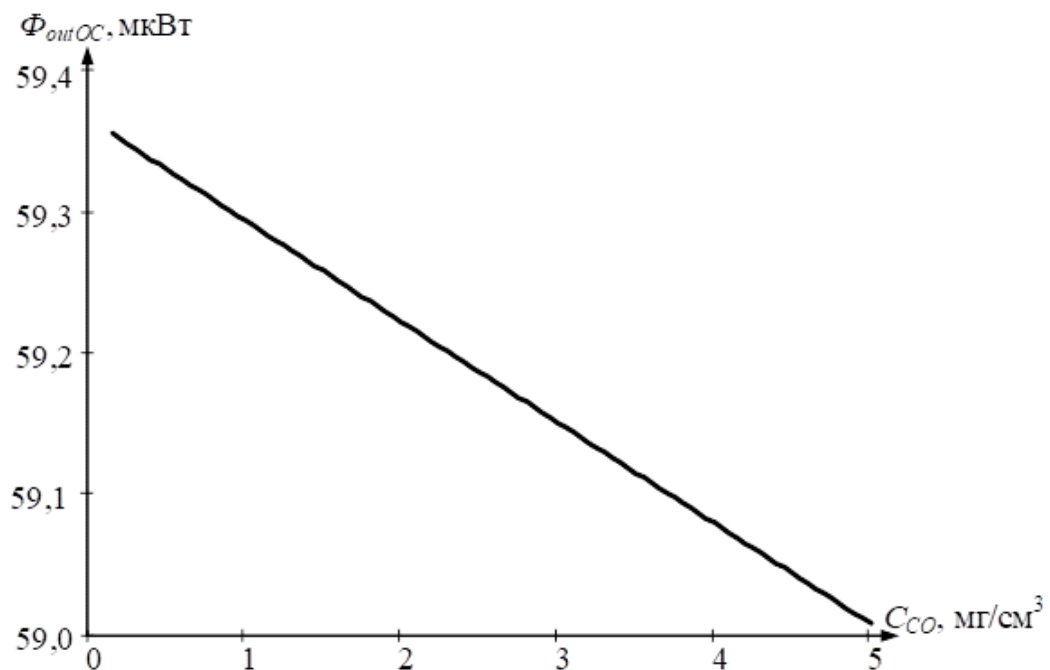


Рисунок 2.8 – Зміна значення вихідного потоку оптичного каналу вимірювача від величини концентрації оксиду вуглецю

2.5 Математична модель спектральної характеристики фотоприймача вимірювального каналу

У схемі оптичного вимірювача для детектування випромінювання застосовується фотодіод типу PD48. Цей фотодіод призначено для детектування інфрачервоного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 3,0 до 6,0 мкм. Фотодіод типу PD48 має такі основні параметри:

- діапазон зміни максимуму довжин хвиль оптичного випромінювання, $\lambda_{\max}$, мкм від 4,8 до 5,3;
- діапазон зміни довжин хвиль детектування оптичного випромінювання довжин хвиль, $\Delta\lambda$, мкм від 3,0 до 6,0;
- інтегральна чутливість вихідного струму до зміни вхідного оптичного потоку випромінювання, $S_{I_{\text{вх}}}$, мА/Вт 6;
- величина темнового струму, I_T , мкА не більше 1;
- постійна часу, τ , нс не більше 20;
- геометричні розміри чутливого елементу до оптичного випромінювання, $a \times b$, мм 3,3x3,3.

Зміну відносної спектральної чутливості фотодіода типу PD46 від довжини хвиль наведено на рис. 2.9. Вихідний сигнал «фотодіода є сигналом зміни струму, функціональна залежність якого визначається таким співвідношенням» [16, 17, 18]:

$$I_{\text{outPD}}(C_{CO}, l, T, P) = S_{\text{int}} \cdot \Phi_{\text{outOC}}(C_{CO}, l, T, P), \quad (2.17)$$

де S_{int} – інтегральна чутливість фотодіода до зміни сигналу оптичного випромінювача; ця характеристика пов'язує між собою спектральні характеристики фотодіода та світлодіода. Проте ця «характеристика відрізняється від інтегральної чутливості фотодіода. Обидві ці характеристики розраховуються за такими співвідношеннями» [16 – 18]:

$$S_{\text{int}} = \int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda; \quad (2.18)$$

$$S_{\text{int}} = S_{\text{Cint}} \cdot s_{\text{Cint}}. \quad (2.19)$$

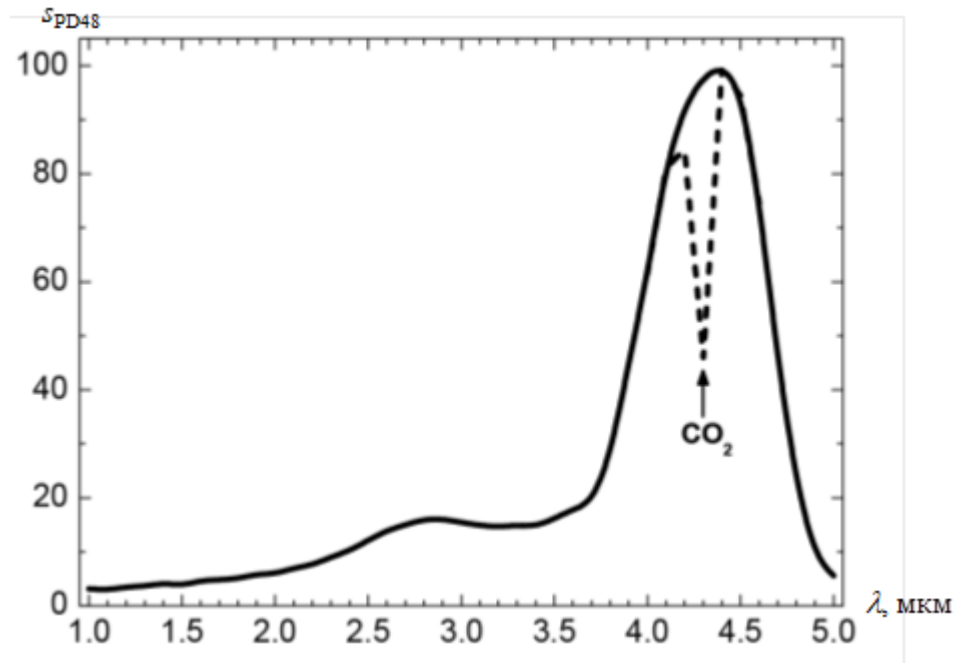


Рисунок 2.9 – Зміна відносної спектральної чутливості фотодіода типу PD48 від довжини хвиль оптичного сигналу

Функціональну залежність «нормованої інтегральної чутливості фотоприймача до зміни оптичного сигналу випромінювача» можна визначити за таким співвідношенням [15]:

$$S_{\text{Cint}} = \frac{\int_0^{\infty} s_{\text{PD48}}(\lambda) \cdot s_{\text{LED46}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} s_{\text{PD48}}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{4,0}^{5,0} s_{\text{PD48}}(\lambda) \cdot s_{\text{LED46}}(\lambda) d\lambda}{\int_{3,5}^{5,5} s_{\text{PD48}}(\lambda) d\lambda} = 0,215. \quad (2.20)$$

«Величину інтегральної чутливості фотодіода до зміни оптичного сигналу випромінювача» можна розрахувати за такою формулою [15]:

$$S_{C_{int}} = S_{I_{int}} \cdot s_{C_{int}} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,215 = 1,292 \frac{\text{мА}}{\text{Вт}}. \quad (2.21)$$

Графік зміни значення вихідного струму фотодіода від величини концентрації оксиду вуглецю наведено на рис. 2.10.

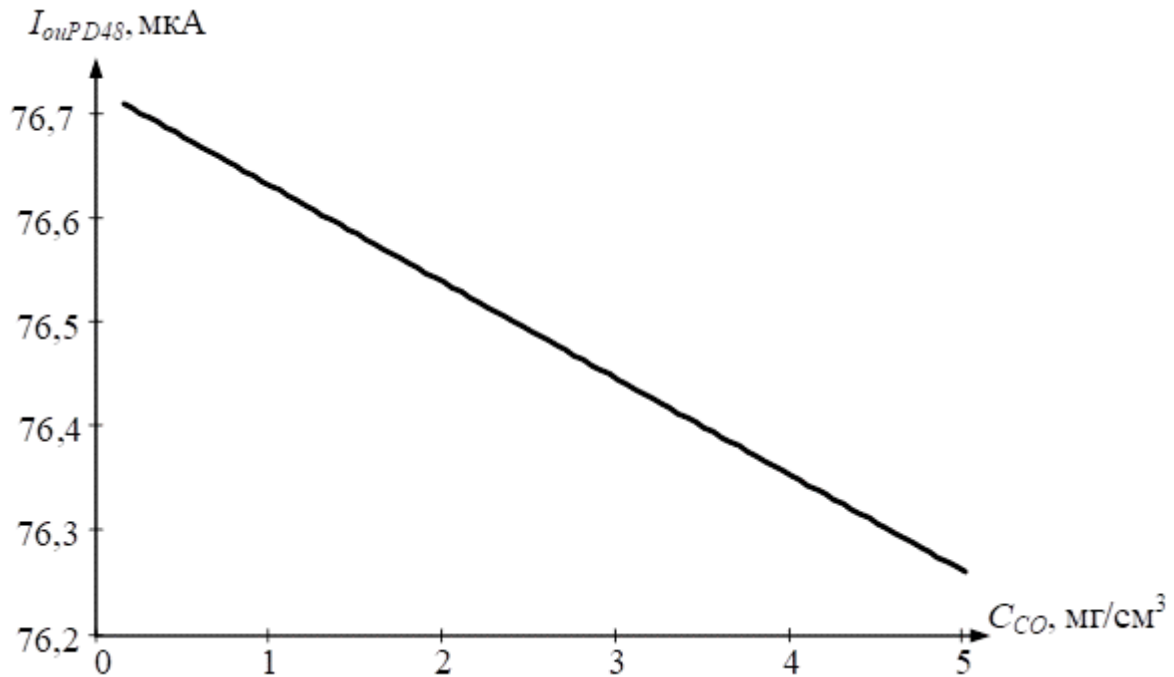


Рисунок 2.10 – Залежність величини вихідного струму фотодіода від зміни концентрації оксиду вуглецю

2.6 Математична модель формування вихідного електричного сигналу вимірювального каналу

Як фотодіоди в оптичному вимірювачі концентрації оксиду вуглецю застосовується фотодіод типу PD48, який розроблений для роботи у фотогальванічному режимі. Принципову схему включення фотодіода типу PD48 у фотогальванічному режимі наведено на рис. 2.11 [18].

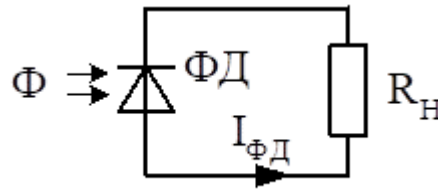


Рисунок 2.11 – Принципова схема включення фотодіода типу PD48 у фотогальванічному режимі

Діапазон зміни вихідного струму фотодіода типу PD48 в залежності від концентрації оксиду вуглецю [19, 20]:

$$\begin{aligned} \Delta I_{outPD48}(C_{CO}) &= I_{outPD48}\left(C_{CO} = 0,15 \frac{\text{мг}}{\text{см}^3}\right) - \\ &- I_{outPD48}\left(C_{CO} = 5,0 \frac{\text{мг}}{\text{см}^3}\right) = 76,711 - 76,261 = 0,450 \text{ мкА}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Якщо розімкнути зовнішнє кола та залишити незмінною освітленість, то величина прямого струму буде збільшуватися до того моменту, коли сила струмів основних, а також неосновних носіїв не будуть дорівнювати між собою. Між выводами переходу утворюється різниця потенціалів, величину якої обумовлено дією освітленості. Якщо підключити до выводів фотодіода опір навантаження, як показано на рис. 2.12. та «за відсутності оптичного випромінювання переходу фотодіода, через опір навантаження буде протікати струм, який обумовлено наявністю неосновних носіїв, що генерують темновий струм I_T » [18 – 20]. Для фотодіода типу PD48 величина темнового струму складає не більш 1 мкА. Якщо з'являється освітленості, то на виході діода генерується додаткова величина фотоструму, що обумовлено неосновними носіями заряду, значення цього струму можна розрахувати за такою функціональною залежністю:

$$I_{outPD}(C_{CO}, l, T, P) = S_{Cint} \cdot \Phi_{outOC}(C_{CO}, l, T, P). \quad (2.23)$$

«Значення сумарного струму, який протікає в колі фотодіода, що працює в фотогальванічному режимі» [20], розраховується як:

$$I_{outPD} = I_T \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U_R}{k \cdot T}\right) \right] - I_{outPD}(C_{CO}, l, T, P), \quad (2.24)$$

де U_R – падіння напруги на навантаженні, що утворюється під час протікання струму в колі; $k=1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постійна Больцмана; e – заряд електрона; $T = 273,15 + t$, K – значення абсолютної температура.

За аналітичною залежністю (2.24) можна розрахувати вольт-амперну характеристику фотодіода під час фотогальванічного включення. Отже, фотодіод, який включений в фотогальванічному режимі, здійснює безпосередньо перетворення оптичної енергії світла до пропорційного значення електричної. «Фотодіод є генератором фото-е.р.с.» У фотогальванічному режимі включення фотодіода падіння напруги на переході діода визначається струмом, що має місце в колі навантаження. «Значення струму в зовнішньому колі дорівнює нулю. Замість U_{RH} підставляється до формули (2.24) значення напруги під час ненавантаженого стану U_{XX} » [20]:

$$0 = I_T \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot U_{XX}}{k \cdot T}\right) \right] - I_{outPD}(C_{CO}, l, T, P). \quad (2.25)$$

З рівняння (2.25) можна знайти падіння напруги, під час дії ненавантаженого стану:

$$U_{outXX}(C_{CO}, l, T, P) = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln(I_{outPD}(C_{CO}, l, T, P) / I_T + 1). \quad (2.26)$$

Залежність зміни падіння напруги під час ненавантаженого стану фотодіода від концентрації оксиду вуглецю наведено на рис. 2.12.

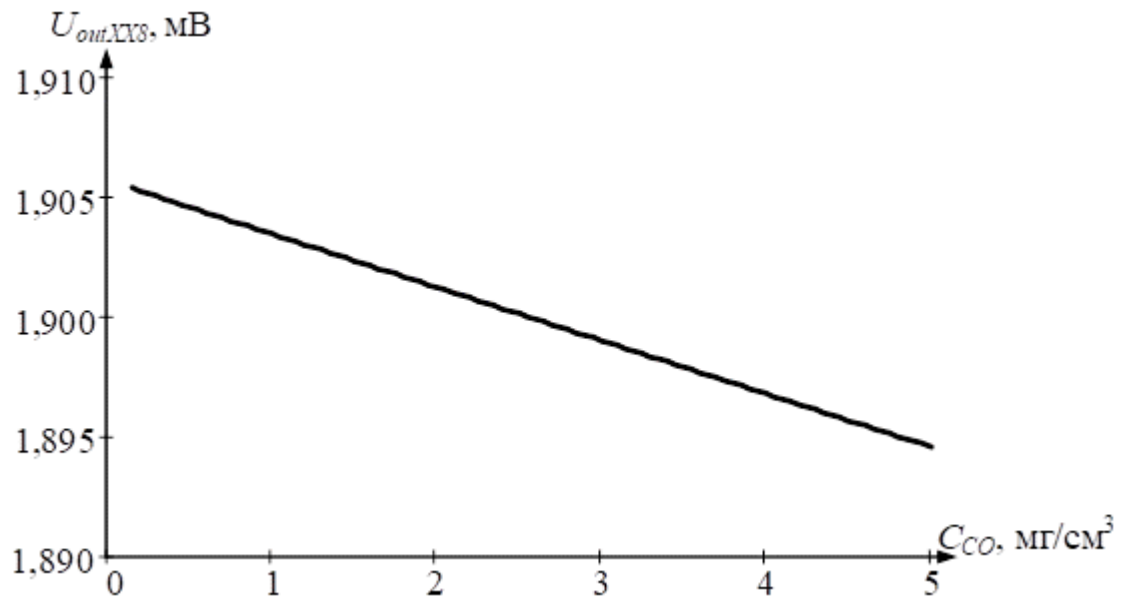


Рисунок 2.12 – Залежність зміни падінні напруги ненавантаженого стану фотодіода від концентрації оксиду вуглецю

Під час збільшення величини оптичного потоку падіння напруги в ненавантаженому стані $U_{outXX}(C_{CO})$ змінюється за логарифмічним законом. Це значення може сягати величини контактної різниці потенціалів переходу діода. Ця залежність є складною та нелінійною під час широкого діапазону зміни оптичного потоку випромінювання, проте лінійність має місце на початковій ділянці характеристики:

$$I_{PD}(C_{CO}, I, T, P) = 0,450 \text{ мкА} < I_T = 1 \text{ мкА}. \quad (2.27)$$

2.7 Висновки

Отримала подальший розвиток модель спектрального представлення поглинання оптичного випромінювання в інфрачервоній області спектра оксидом вуглецю. Математична модель пов'язує має такі параметри, як довжина хвилі оптичного поглинання, зміна інтенсивності поглинання оптичного випромінювання оксидом вуглецю в діапазоні довжин хвиль. Також модель зв'язує такі дестабілізуючі фактори, як зміна температури та тиску.

Отримала подальший розвиток математична модель оптичного блоку інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю. Ця модель пов'язує між собою переважну більшість дестабілізуючих факторів, зміна яких впливає на розповсюдження інфрачервоного випромінювання в оптичному каналі системи. До цих факторів відносяться оптична неоднорідність каналу, яка пов'язана зі застосуванням в каналі матеріалів, що мають різні оптичні властивості. На базі діаграми спрямованості джерела оптичного випромінювання розроблено модель введення випромінювання до фотоприймача. Під час моделювання розраховано значення коефіцієнта введення, величина якого становить менше 5 % від значення потоку випромінювання від світлодіода.

Обґрунтовано вибір джерела інфрачервоного випромінювача, який є світлодіодом типу LED46. Цей світлодіод застосовується для розробки інформаційно-вимірювальних системи визначення концентрації оксиду вуглецю. Також обґрунтовано вибір приймача інфрачервоного випромінювача – фотодіод типу PD48.

Під час математичного моделювання розраховано характеристику перетворення вимірювального каналу систем, яка функціонально залежить від зміни об'ємної концентрації оксиду вуглецю та таких дестабілізуючих факторів як зміна температури й тиску, довжини оптичного каналу, діапазоні зміни довжин хвиль випромінювача та приймача системи.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗРОБЛЕНОГО ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ

3.1 Дослідження метрологічних характеристик вимірювача концентрації оксиду вуглецю під час зміни дестабілізуючих факторів

Інформаційно-вимірювальна системи концентрації оксиду вуглецю, що розробляється, повинна функціонувати в реальних умовах експлуатації під впливом дії навколишнього середовища, такі параметри якого, як температура тиск, вологість та ін., суттєво впливають на метрологічні характеристики і параметри системи. Також, сам «об'єкт вимірювання – газове середовище має багато дестабілізуючих факторів, що впливають на роботу системи. Так вимірюванню підлягає тільки один параметр – концентрація оксиду вуглецю, всі інші – фактори, зміна яких впливає як вимірюваний параметр, так і на результат вимірювання» [21 – 23].

Розглянути вплив на вимірювальну систему зміну всіх факторів, є вельми складною задачею, а здійснювати облік та компенсація цих дестабілізуючих факторів практично нереально. Тому необхідно провести аналіз ступеню впливу на цих факторів, та здійснити вибір тих факторів, що мають найбільший вплив на результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю. Це дозволяє істотно зменшити кількість дестабілізуючих факторів та спростити апаратно-програмні засоби їх компенсації.

З переліку дестабілізуючих факторів, що впливають на результати вимірювання, необхідно виділити такі фактори:

- наявність у газовій суміші, що аналізується інших газів, концентрація яких не вимірюється;
- наявність у газовій суміші пари води та часток пилу;
- зміна температури та тиск газової суміші, що аналізується;
- вплив зміни температура на параметри вимірювальних блоків

інформаційно-вимірювальної системи.

Супутні гази суміші також поглинають інфрачервоне випромінювання, як оксид вуглецю. Також аналогічно впливає наявність у аналізованій газовій суміші пари води та пилу на результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю. «Частинки пилу розсіюють оптичне випромінювання, що послаблює інтенсивність його потоку. Пил осідає на вікнах оптичного каналу системи та утворює плівку. Це також зменшує інтенсивність інфрачервоного випромінювання оптичної системи» [21]. У таблиці 3.1 наведено результати досліджень зміни значення вихідної напруги фотоприймача під час дії різних коефіцієнтів пропускання оптичного випромінювання пиловим аерозолем.

Таблиця 3.1 – Зміна значення вихідної напруги фотоприймача під час дії різних коефіцієнтів пропускання випромінювання пиловим аерозолем

Коефіцієнт пропускання оптичного випромінювання пиловим аерозолем	$\underline{U_{\text{вихФП}}}$, якщо $\underline{C_{\text{COmin}}}$, В	$\underline{U_{\text{вихФП}}}$, якщо $\underline{C_{\text{COmax}}}$, В
0,0	0,757	0,311
0,5	0,456	0,189
1,0	0,279	0,115
1,5	0,169	0,069
2,0	0,103	0,042
2,5	0,062	0,026

Зміна температури та тиску аналізованої газової суміші істотно впливає на результат вимірювання концентрації газу. «Для оцінки величини впливу зміни цих факторів на інформаційний сигнал виконано аналіз зміни величини вихідної напруги фотоприймача оптичної системи, значення якого залежить від зміни температури й тиску аналізованої газової суміші» [22]. (див. табл. 3.2 та 3.3). Під час аналізу результатів досліджень можна зробити висновок, що зміна цих дестабілізуючих факторів істотно впливає на величину інформаційного сигналу та на результати вимірювання концентрації оксиду вуглецю.

Таблиця 3.2 – Значення вихідної напруги фотоприймача під час зміни температури аналізованої газової суміші

Температура газової суміші		$U_{\text{вихФП, якщо}}$	$U_{\text{вихФП, якщо}}$
$T, \text{К}$	$t, ^\circ\text{C}$	$C_{\text{COmin}}, \text{В}$	$C_{\text{COmax}}, \text{В}$
300	27	0,757	0,620
320	47	0,757	0,562
330	57	0,757	0,529
350	77	0,757	0,460
370	97	0,757	0,390
390	117	0,757	0,321
400	127	0,757	0,289

Таблиця 3.3 – Значення вихідної напруги фотоприймача під час зміни тиску аналізованої газової суміші

Тиск газової суміші		$U_{\text{вихФП, якщо}}$	$U_{\text{вихФП, якщо}}$
$P, \text{кПа}$	$P, \text{м.рт.ст.}$	$C_{\text{COmin}}, \text{В}$	$C_{\text{COmax}}, \text{В}$
97,3	730	0,757	0,007
102,8	770	0,757	0,021
108,3	810	0,757	0,052
113,7	850	0,757	0,111
119,2	890	0,757	0,198
125,0	940	0,757	0,311
130,1	975	0,757	0,415
135,6	1015	0,757	0,515
141,0	1055	0,757	0,596
146,5	1100	0,757	0,655
152,0	1140	0,757	0,695

Також істотно впливає на результат вимірювання зміна температури блоків і вузлів інформаційно-вимірювальної системи. Зміна цього фактору впливає на функціонування напівпровідникових елементів, які є основою інформаційно-вимірювальної системи. Суттєво результат вимірювання залежить від зміни температури навколишнього середовища на блоки, де здійснюється перетворення інформаційного аналогового сигналу. До цих блоків відносять вимірювальні підсилювачі та нормуючі перетворювачі вимірювального каналу системи.

3.2 Розробка компенсації змін температури й тиску на результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю

Для забезпечення усунення впливу зміни температури і тиску необхідно пов'язати зміни цих факторів зі статичною характеристикою перетворення вимірювального каналу системи визначення концентрації оксиду вуглецю. Аналіз статичної характеристики перетворення вимірювача будемо виконувати на виході нормуючого підсилювача аналогового вимірювального каналу системи. Як інформаційний сигнал скористаємося східчастим сигналом, що застосовується для градуювання вимірювача. На рис. 3.1. наведено статичні характеристики перетворення вихідного сигналу нормуючого підсилювача вимірювального каналу від зміни температури й тиску аналізованої газової суміші. На рис. 3.1 позначено: 1 – якщо $T=393\text{ K}$, $P=125,0\text{ кПа}$; 2 – $T=403\text{ K}$, $P=125,0\text{ кПа}$; 3 – $T=393\text{ K}$, $P=115,0\text{ кПа}$.

З аналіз характеристик, що наведено на рис. 3.1, можна зробити висновок, що вплив зміни температури й тиску можна усунути, якщо здійснювати корекцію коефіцієнта підсилення різницевого підсилювача. Під час реалізації системи необхідно застосовувати вузол самонастроювання. Для реалізації цього принципу необхідно встановити, як залежить зміна коефіцієнта підсилення за напругою від змін температури і тиску аналізованої газової суміші.

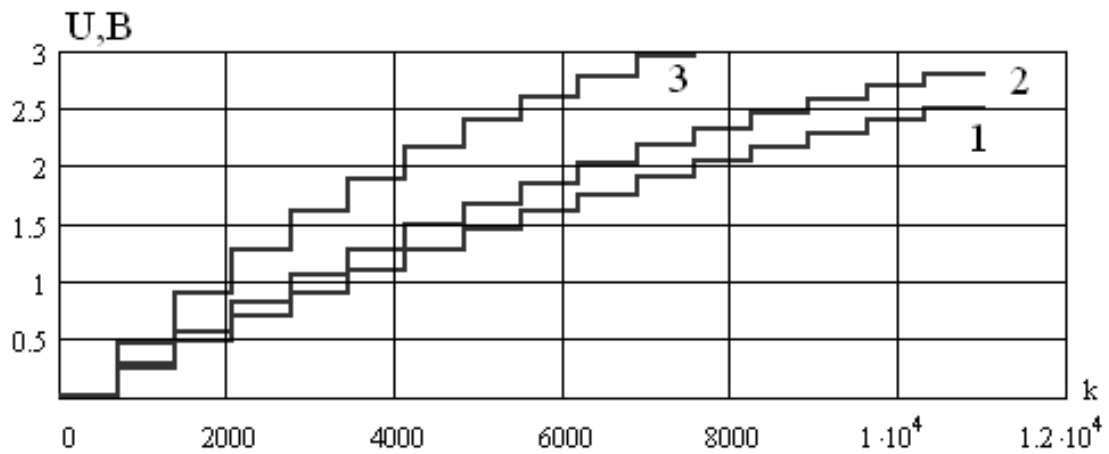


Рисунок 3.1 – Статичні характеристики перетворення вихідного сигналу нормуючого підсилювача від зміни температури й тиску аналізованої газової суміші

Температура аналізованої газової суміші може змінювати своє значення в діапазоні від 283 К до 423 К, а тиск – від 97,3 кПа до 152,0 кПа. «Якщо виділити для зміни температури й тиску по 10 контрольних точок, та за допомогою методу найменших квадратів, отримано поліноміальну залежність зміни коефіцієнта підсилення за напругою від температури й тиску. Для функції двох змінних ця залежність має такий вигляд» [23]:

$$k(T, P) = a_0(P) + a_1(P) \cdot T^1 + a_2(P) \cdot T^2, \quad (3.1)$$

де $A_i(P)$ – функціональний коефіцієнт, значення якого визначається за формулою:

$$a_i(P) = \sum_{j=0}^2 b_{i,j} \cdot P^j, \quad (3.2)$$

де $b_{i,j}$ – матриці коефіцієнтів полінома, які розраховані з розробленою математичною моделлю та мають такі значення:

$$b_0 = \begin{pmatrix} -130,1106 \\ 4,27 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}; \quad b_1 = \begin{pmatrix} 1,48996 \\ -5,0 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}; \quad b_2 = \begin{pmatrix} -5,51 \cdot 10^{-3} \\ 1,0 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Для реалізації в інформаційно-вимірювальній системі самонастроювання коефіцієнта підсилення за напругою різницевого підсилювача необхідно ввести до складу системи два вимірювальні канали температури й тиски аналізованої газової суміші.

«За результатом вимірювання величини C результат спотворюється через наявність адитивної Δ_u та мультиплікативної γ складових похибок» [24]:

$$y_1 = k_0 \cdot (1 + \gamma) \cdot C + \Delta_u, \quad (3.3)$$

де k_0 – номінальна величина крутизна статичної характеристики перетворення вимірювального каналу системи.

Для зменшення або виключення цих похибок використовують різні способи корекції. Спосіб адитивної корекція базується на тому, що з подачею до входу засобу корекції вимірювання відомого значення величини C_{01} , що за статичною номінальною характеристикою перетворення 1 засобу вимірювання має відповідати величина y_0 , розраховують коригуючий вплив за алгоритмом $D_k = k_0 \cdot C_0 + u_0$, де $u_0 = k_0 \cdot (1 + \gamma) C_{01} + \Delta_u$ – результат вимірювання значення величини x_{01} . Потім під час вимірювання вплив корегування D_k підставляється до рівняння вимірювання. Отже, «функція перетворення засобу вимірювання з корекцією має такий вигляд $y = F_c(x) = [k_0 \cdot (1 + \gamma) \cdot C + \Delta_u] + D_k$, що зсуває статичну характеристику перетворення $u = f(C)$ паралельно собі на значення D_k (див. рис. 3.2). Похибка результату вимірювання після корекції Γ під час здійснення вимірювання значення x визначається за формулою» [24]:

$$\Gamma = \gamma(C - C_{01})/C, \quad (3.4)$$

з цього виразу видно, що величина похибка дорівнює нуля, якщо $x = x_{01}$.

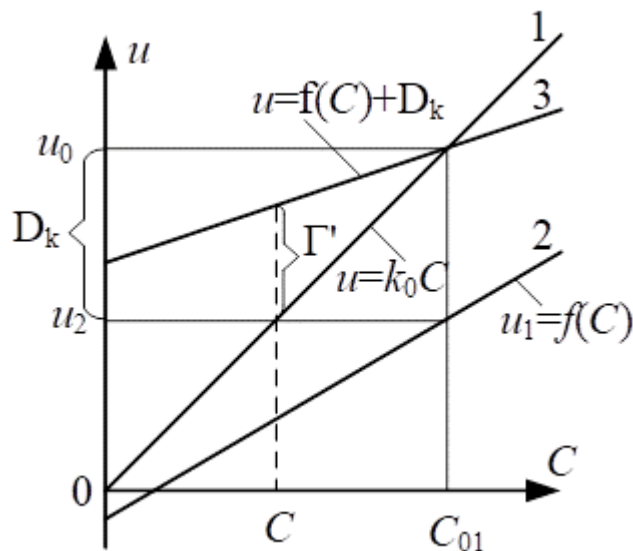


Рисунок 3.2 – Інтерпретація зміни статичної характеристик перетворення під час реалізації адитивної корекції похибок вимірювання

«Під час реалізації мультиплікативної корекції до входу засобу вимірювання подається відоме значення величини C_{02} та розраховується величина корегуючого множника K_k . Розрахунок здійснюється за алгоритмом $K_k = K_0 \cdot C_{02} / u_0$, де u_0 результат вимірювання значення величини C_{02} . Під час вимірювання величина корегуючого множника K_k підставляється до рівняння вимірювача» [24]. Функція статичної характеристики перетворення засобу вимірювання з корекцією має такий вид $u = F_c(C) = [k_0 \cdot (1 + \gamma) \cdot C + \Delta u] \cdot K_k$. Це є еквівалент під час зміни нахилу статичної характеристики перетворення $u = f(C)$ під час повертання її навколо точки a (див. рис. 3.3). Величина похибка результату Γ'' вимірювання величини x після коригування визначається за такою формулою:

$$\Gamma'' = (\delta_C - \delta_{C0}) / (1 + \delta_{C0}), \quad (3.5)$$

де $\delta = \Delta u / [k_0 \cdot (1 + \gamma) \cdot C]$; $\delta_{C0} = \Delta u / [k_0 (1 + \gamma) C_0]$ – відносне значення величини адитивних похибок. На рис. 3.3 введено такі самі позначення, як і на рис. 3.2.

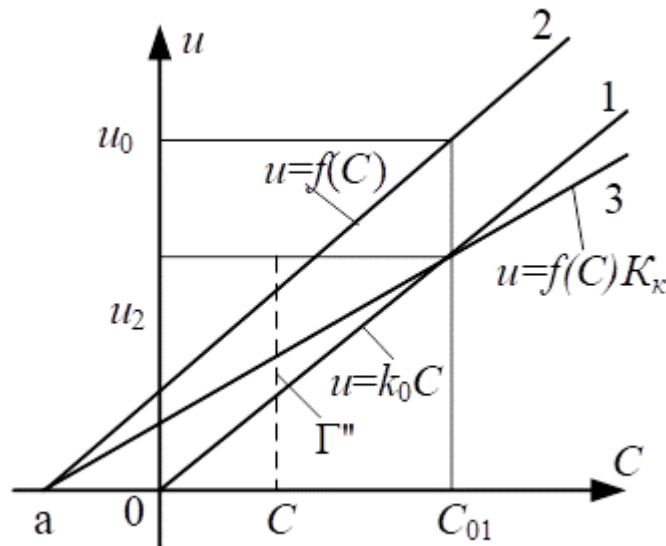


Рисунок 3.3 – Інтерпретація зміни статичної характеристик перетворення під час реалізації мультиплікативної корекції похибок вимірювання

З аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що під час реалізації обох способів можна відновити статичну характеристику перетворення тільки в околиці точки $C=C_0$. «Якщо здійснювати формування коригуючого впливу D_k зі застосуванням одного значення величини x_{01} , а для корегуючого множника K_k інше значення C_{02} , то функцію статичного перетворення засобу корекції буде мати такий вигляд» [24]:

$$u=F_c(C)=[f(C)+D_k]\cdot K_k, \quad (3.6)$$

то зі застосуванням лінійної моделі засобу вимірювання з корекцією статична характеристика перетворення відновлюється в усьому діапазоні змін значень вимірюваної величини C . Отже, кожний зі способів адитивної та мультиплікативної корекції здійснює відновлення номінальної статичної характеристики перетворення в точках $C=C_{01}$ та $C=C_{02}$ то через лінійність моделі номінальної характеристики перетворення забезпечується відновлення в усіх інших точках. Розглянута сумісна адитивна та мультиплікативна корекція використовується в більшості цифрових вимірювача напруги.

«Адитивний спосіб корекція, якщо $C_{01}=0$ дозволяє спростити визначення корегуючої добавки D_k , величина якої дорівнює значенню адитивної похибки. Операція визначення та формування корегуючої добавки має назву «установка нуля». Мультиплікативна корекції, яка дозволяє здійснювати компенсацію відмінності значення коефіцієнта перетворення під час визначення корегуючого множника K_k називається «калібруванням». Вона здійснюється під час подачі калібрувальної напруги, значення якої відповідає номінальному значенню в діапазоні вимірювання. Реалізація адитивного та мультиплікативного способів корекції під час застосовування різних моделей засобів вимірювання має відмінності за технічними рішеннями» [24].

Ітераційний спосіб корекції результатів вимірювання. Принцип дії компенсації впливу зміни температури характеристики та параметри аналогової частину вимірювального каналу концентрації оксиду вуглецю базується на масштабуванні вимірювальної величини нормуючим перетворювачем 4 (див. рис. 3.4) та здійснення перетворення напруги АЦП 5 до цифрового еквівалента. У інформаційно-вимірювальній системі застосовується автоматична, під час зміни температури мікропроцесорний пристрій МПК 11 формує сигнал «Сигнал керування від МПК продування оптичного каналу». Під час дії цієї операції концентрація аналізованого газового компонента у вимірювальному каналі зменшується практично до нуля. На виході нормуючого підсилювача НП 4 та АЦП 5 має місце максимальне значення вихідного сигналу, що відповідає рівню +2,5 В. Якщо, під час зміни температури характеристики та параметри аналогової блоку каналу відрізняються від номінальних значень, то включається алгоритм корекції, який завдяки ЦАП 6 забезпечує зміну напруги на вході НП 4, до того моменту поки напруга на виході не буде дорівнювати максимальному рівню з величиною +2,5 В. Потім здійснюється формування корегуючої добавки, що є аналогічним. Це дозволяє зменшити та уникнути перевантажень АЦП 5 під час дії великих значень адитивної похибки. Після цього МПК 11 виключає сигнал «Сигнал керування від МПК, продування оптичного каналу» та система функціонує в штатному режимі.

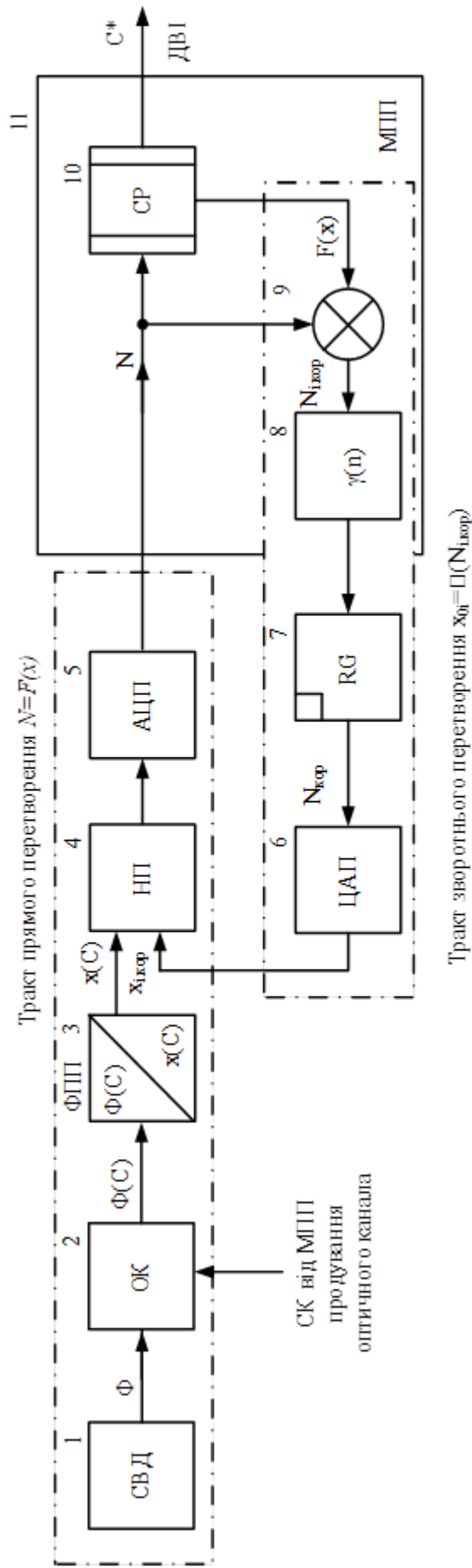


Рисунок 3.4 – Схема вимірювальної системи з реалізацією ітераційного способу корекції результатів вимірювання

Одним із завдань є визначення такого коду $N_{\text{ікр}} = C_{0i}$, яке буде здійснювати керування роботою цифро-аналогового зворотного перетворювача. Під час дії цього «коду результат вимірювання C та значення відомого вихідного сигналу N_0 під час зворотного перетворювача 6 будуть дорівнювати між собою» [24]:

$$F[\varphi(N_{\text{ікр}}) - C] = N, \quad (3.7)$$

де F – функція вимірювального каналу прямого перетворення (блоки 3, 4 і 5 на рис. 3.4); $N = F(C)$ – цифровий еквівалент коду прямого перетворення x .

Рівняння (3.7) називається рівняння корекції. Визначення значення коду, що задовольняє (3.7), здійснюється ітераційно під час послідовного наближенням за допомогою такого алгоритму:

$$N_{n+1} = N_n - \gamma(n)\{F[\varphi(N_n)] - F(C)\}, n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.8)$$

де n – номер ітерації в циклі корекції; N_n – цифровий еквівалент скоригованого коду, який здійснює керування зворотним перетворювачем 6; γ_n – крок роботи алгоритму; φ – функція зворотного перетворення ЦАП 6.

Наведений спосіб застосовується для підвищення точності вимірювань як алгоритм ітераційної корекції похибок. Різні варіанти цього способу можуть бути отримано (3.8) під час конкретних задавань та правил вибору кроку роботи алгоритму γ_n , що здійснюється в блоці 8 на кожній його ітерації. Виконаємо «аналіз послідовності операцій у відповідно до узагальненого алгоритму (3.8). Зміна та корекція похибок на кожній ітерації здійснюється в два етапи» [24].

На першому етапі визначення функція $F(C)$. Вхідне значення вимірюваної величини C подається до входу аналого-цифрового перетворювача, що здійснює корегування 3, 4, 5. Визначене значення $F(C)$ та отриманий код N передається та запам'ятовується регістром 11.

На другому етапі здійснюється коригування похибок. До входу тракту

коригування прямого перетворювача 3, 4, 5 надходить вихідна величина $\varphi(N_{i,ker}) - C$ від тракту зворотного перетворення. Виміряне значення величини $F[\varphi(Nn)]$ сумісно з N_n та $F(C)$ під час порівняння кодів визначається нове значення скоригованого результату. Отримана величина коду N_{n+1} зберігається в блоці 7 як оновлене значення результату N_0 . На цьому закінчується один з циклів коригування, наступні ітерації виконуються аналогічно.

На величину максимального значення точності, що може бути досягнуто під час використання ітераційного способу корекції похибок, накладають обмеження вплив таких основних дестабілізуючих факторів: похибка зворотного перетворювача, похибка, значення якої обумовлено продуванням оптичного каналу вимірювача 2; випадкові похибки, а також похибки під час квантування тракту корекції АЦП 5. Останній із зазначених факторів має несуттєвий вплив. Під час практичної реалізації важко забезпечити вимоги щодо короткочасної стабільності вузлів та елементів тракту корекції для двох вимірювань, що достатньо швидко виконуються. Для зменшення величини випадкової складової похибок необхідно застосовувати в тракті АЦП 5, що інтегрує.

Отже, основним важливим дестабілізуючим фактором під час застосування способу ітераційної корекції є похибки ЦАП 6. ЦАП входить до складу тракту зворотного перетворення для здійснення самокоригування вимірювальної системи.

Наявність систематичних похибок під час ітераційної корекції, а також аномальних похибок, що мають місце на окремих ітераціях, не погіршують збіжності процесу корекції. Ці помилки зменшують тільки швидкодію вимірювача, а не його точність.

3.3 Дослідження метрологічних характеристик під час функціонування вимірювального каналу системи

Для визначення метрологічних характеристик вимірювальної системи необхідно провести дослідження під час зміни дестабілізуючих факторів, зміна яких впливає на результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю. Для проведення досліджень визначимо дестабілізуючі фактори та діапазони їх зміни:

- температура газової суміші $T=(283 - 423)$ К;
- тиск суміші у вимірювальному каналі системи $P=(97,3 - 152,0)$ кПа;
- діапазон зміни концентрації оксиду вуглецю $(0 - 10)$ об. %.

Настройка та градування інформаційно-вимірювальної системи виконується під час дії нормальних умов $T=293$ К ($t=20$ С); $P=101,325$ кПа.

Під час проведення повнофакторного експерименту має місце багатовимірний масив статистичну даних. Обробка цих даних є досить складним завданням. Отже, виконуємо ряд окремих експериментів під час зміни кожного з факторів. У циклі вимірювань здійснюється зміна лише одного фактору, а інші залишаються без змін.

Під час проведення такого дослідження маємо набір окремих статистичних величин та виконуємо обробку їх від впливом кожного з факторів. Відносні похибка вимірювання концентрації оксиду вуглецю від зміни температури газової суміші наведено в таблиці 3.4 та від зміни тиску газової суміші в таблиці 3.5.

Результати експериментальних досліджень добре характеризують роботу запропонованих і розроблених засобів компенсації зміни температури й тиски газової суміші. Результати досліджень використано для отримання поліноміальної залежності $k_{кор}(T,P)$. Під час аналізу результатів дослідження встановлено, що найкращі результати отримано під час компенсації зміни дестабілізуючих факторів. Система без компенсації показала доволі задовільні результати тільки під час дії нормальних умов експлуатації.

Таблиця 3.4 – Відносна похибка вимірювання концентрації оксиду вуглецю від зміни температури газової суміші

Температура газової суміші		Відносна похибка вимірювання, δ_{CO} , %	
T , К	t , °С	без засобів компенсації	зі засобами компенсації
283	10	35,6	0,10
290	17	30,1	1,78
300	27	28,3	1,23
315	42	27,6	1,35
325	52	26,1	0,15
330	57	25,5	0,56
340	67	23,2	0,84
350	77	20,1	1,53
360	87	17,6	1,21
370	97	10,1	1,32
381	108	3,3	0,91
393	120	1,1	0,12
400	127	5,2	0,98
410	137	7,6	1,45
415	142	15,2	1,21
423	150	25,4	0,14
		$\delta_{CP}=19,0$ %	$\delta_{CP}=0,9$ %
		$\sigma=10,2$	$\sigma=0,53$

Для отримання максимального значення похибки системи зі застосуванням засобів компенсації, проведено дослідження метрологічних характеристик системи під час дії значень температури й тиску з найгіршими результатами $T=290$ К; $P=102,0$ кПа.

Таблиця 3.5 – Відносна похибка вимірювання концентрації оксиду вуглецю від зміни тиску газової суміші

Тиск газової суміші		Відносна похибка вимірювання, δ_{CO} , %	
P , кПа	P , мм.рт.ст.	без засобів компенсації	зі засобами компенсації
97,3	730	31,4	0,12
100,0	750	28,4	0,98
102,0	765	21,3	1,45
105,0	790	19,0	1,06
108,3	810	17,2	0,17
109,0	815	15,2	1,17
110,0	825	13,9	1,32
115,0	860	9,1	1,15
120,0	900	3,5	0,76
125,0	937	1,51	0,21
130,0	975	5,2	0,82
135,0	1012	10,2	1,12
139,0	1042	15,3	0,95
142,5	1068	23,8	1,25
150,0	1125	28,7	1,09
152,0	1140	30,2	0,15
		$\delta_{CP}=17,1$ %	$\delta_{cp}=0,9$ %
		$\sigma=9,4$	$\sigma=0,43$

У цьому випадку величина відносної похибки вимірювання концентрації оксиду вуглецю складає $\pm 2,1$ %. Це значення відносної похибки не перевищують допустимого, тому реалізація засобів компенсації зміни дестабілізуючих факторів є обґрунтованою.

3.4 Висновки

З усього переліку дестабілізуючих факторів, що впливають на результати вимірювання, варто виділити такі фактори:

- наявність у газовій суміші, що аналізується інших газів, концентрація яких не вимірюється;
- наявність у газовій суміші пари води та часток пилу;
- зміна температури та тиск газової суміші, що аналізується;
- вплив зміни температура на параметри вимірювальних блоків інформаційно-вимірювальної системи.

Для підвищення точності вимірювання концентрації оксиду вуглецю необхідно виконувати облік та компенсацію зазначених факторів.

Наявність у газовій суміші, що аналізується частинок пилу та пари води можна не враховувати, тому що до складу інформаційно-вимірювальної системи повинна входити система підготовки проби, що складається з фільтрів для здійснення очистки аналізованої газової суміші від пари води та частинок пилу.

Обґрунтовано та розроблено спосіб компенсації впливу зміни температури й тиску газової суміші на результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю. Розроблений спосіб компенсації базується на масштабуванні вимірювальної величини перетворювачем. Розроблено структуру системи для реалізації запропонованого способу. Величини відносна похибка вимірювання концентрації оксиду вуглецю складає $\pm 2,1$ %. Це значення відносної похибки не перевищують допустимого, тому реалізація засобів компенсації зміни дестабілізуючих факторів є обґрунтованою.

4 ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ОПТИКО-АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ

Основною функцією інформаційно-вимірювальної системи, що розробляється, є вимірювання концентрації оксиду вуглецю в газовій суміші. Структурну схему інформаційно-вимірювальної системи концентрації оксиду вуглецю наведено на рис. 4.1, де позначено: «ДВ – джерело випромінювання; ОК – оптичний канал вимірювальної системи; ФПП – фотоприймальний пристрій; ФП – підсилювач вихідного сигналу фотоприймального пристрою; НП – нормуючий підсилювач; АЦП – аналого-цифровий перетворювач, що входить до складу мікропроцесорної системи; МПС – мікропроцесорна система; ЦІ – цифрова індикація, за допомогою якої виводиться результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю; ПК – персональний комп'ютер» [8].

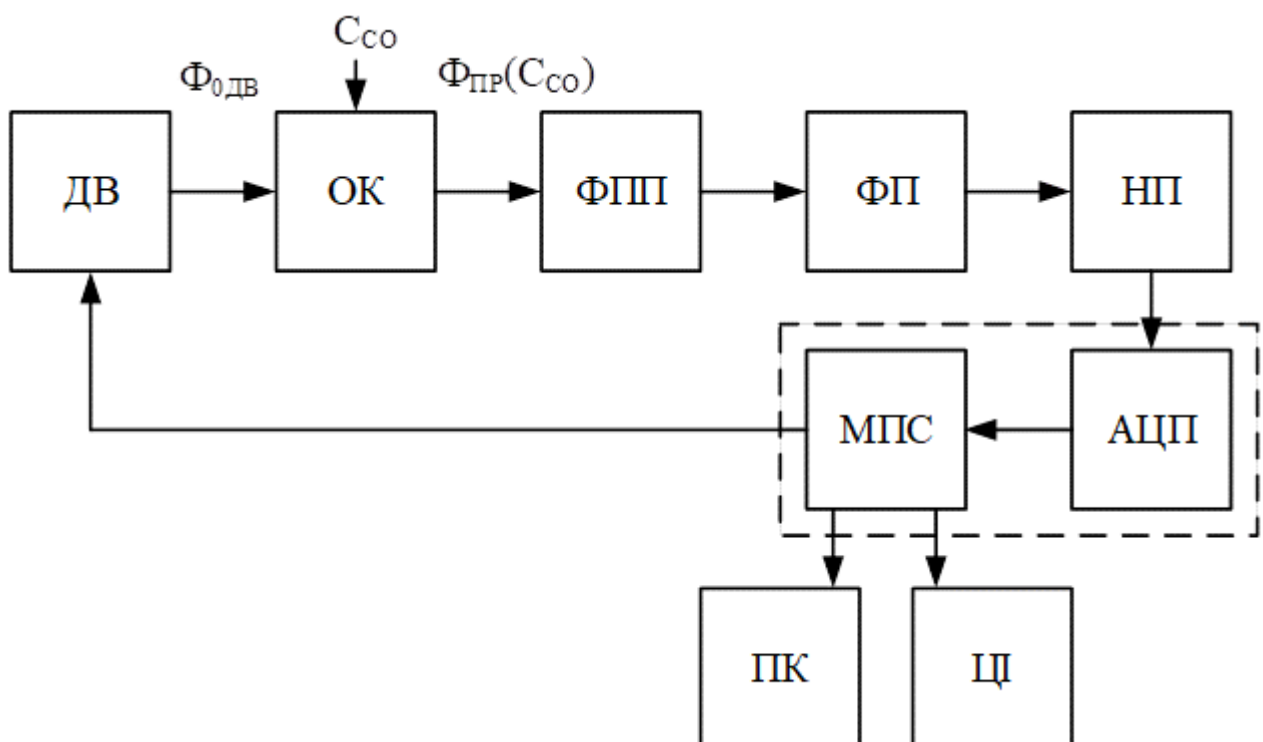


Рисунок 4.1 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи концентрації оксиду вуглецю

Джерело оптичного випромінювання (ДВ) формує рівномірний направлений потік випромінювання ($\Phi_{0ДВ}$), що проходить через оптичний канал, де знаходиться газова суміш з аналізованою концентрацією оксиду вуглецю. До фотоприймального пристрою (ФПП) надходить ослаблений оптичний потік випромінювання, що обумовлено поглинанням в оптичному каналі ($\Phi_{пр}(C_{CO})$). Цей сигнал має інформацію щодо зміни концентрації оксиду вуглецю в оптичному каналі системи. ФПП здійснює перетворення величини оптичного потоку до пропорційного значення електричного сигналу. Цей електричний сигнал від ФПП надходить до вимірювального каналу системи.

Як джерело оптичного випромінювання обґрунтовано вибраний світлодіод. Оптичний потік, який проходить через оптичний канал, потрапляє до фотоприймача, який є фотодіодом, що включений до фотопідсилювача (ФП). ДВ та ФПП вибрані так, щоб вони випромінювали та поглинали інфрачервоне випромінювання на максимальній довжині хвилі його поглинання оксидом вуглецю. На виході ФП має місце падіння напруги, величина якої становить декількох мВ. Цей сигнал приводиться до уніфікованого вигляду та перетворюється АЦП до цифрової форми. Нормуючий підсилювач застосовується для уніфікації вихідного сигналу ФП, отже на виході НП має місце вихідний сигнал напруги, який змінюється в діапазоні від 0 до 2,5 В. «Нульове значення сигналу (0 В) відповідає мінімальній концентрації оксиду вуглецю, а максимальне значення (+2,5 В) відповідає максимальній концентрації оксиду вуглецю. АЦП здійснює перетворення аналогового сигналу до двійково-десятькового еквіваленту. Ця форма сигналу обробляється мікропроцесорною системою. Отримана інформація щодо зміни концентрації оксиду вуглецю виводиться на екрані блоку цифрової індикації та передається до персонального комп'ютера» [8].

ВИСНОВКИ

Отримала подальший розвиток модель спектрального представлення поглинання оптичного випромінювання в інфрачервоній області спектра оксидом вуглецю. Математична модель пов'язує має такі параметри, як довжина хвилі оптичного поглинання, зміна інтенсивності поглинання оптичного випромінювання оксидом вуглецю в діапазоні довжин хвиль. Також модель зв'язує такі дестабілізуючі фактори, як зміна температури та тиску.

Отримала подальший розвиток математична модель оптичного блоку інформаційно-вимірювальної системи визначення концентрації оксиду вуглецю. Ця модель пов'язує між собою переважну більшість дестабілізуючих факторів, зміна яких впливає на розповсюдження інфрачервоного випромінювання в оптичному каналі системи. До цих факторів відносяться оптична неоднорідність каналу, яка пов'язана зі застосуванням в каналі матеріалів, що мають різні оптичні властивості. На базі діаграми спрямованості джерела оптичного випромінювання розроблено модель введення випромінювання до фотоприймача. Під час моделювання розраховано значення коефіцієнта введення, величина якого становить менше 5 % від значення потоку випромінювання від світлодіода.

Обґрунтовано вибір джерела інфрачервоного випромінювача, який є світлодіодом типу LED46. Цей світлодіод застосовується для розробки інформаційно-вимірювальних системи визначення концентрації оксиду вуглецю. Також обґрунтовано вибір приймача інфрачервоного випромінювача – фотодіод типу PD48.

Під час математичного моделювання розраховано характеристику перетворення вимірювального каналу систем, яка функціонально залежить від зміни об'ємної концентрації оксиду вуглецю та таких дестабілізуючих факторів як зміна температури й тиску, довжини оптичного каналу, діапазоні зміни довжин хвиль випромінювача та приймача системи.

З усього переліку дестабілізуючих факторів, що впливають на результати вимірювання, варто виділити такі фактори:

- наявність у газовій суміші, що аналізується інших газів, концентрація яких не вимірюється;
- наявність у газовій суміші пари води та часток пилу;
- зміна температури та тиск газової суміші, що аналізується;
- вплив зміни температура на параметри вимірювальних блоків інформаційно-вимірювальної системи.

Для підвищення точності вимірювання концентрації оксиду вуглецю необхідно виконувати облік та компенсацію зазначених факторів.

Наявність у газовій суміші, що аналізується частинок пилу та пари води можна не враховувати, тому що до складу інформаційно-вимірювальної системи повинна входити система підготовки проби, що складається з фільтрів для здійснення очистки аналізованої газової суміші від пари води та частинок пилу.

Обґрунтовано та розроблено спосіб компенсації впливу зміни температури й тиску газової суміші на результат вимірювання концентрації оксиду вуглецю. Розроблений спосіб компенсації базується на масштабуванні вимірювальної величини перетворювачем. Розроблено структуру системи для реалізації запропонованого способу. Величини відносна похибка вимірювання концентрації оксиду вуглецю складає $\pm 2,1$ %. Це значення відносної похибки не перевищують допустимого, тому реалізація засобів компенсації зміни дестабілізуючих факторів є обґрунтованою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Системный анализ контроля и управления качеством воздуха и воды / под ред. В.В. Кафаров, К.И. Качиашвили. – К.: Наукова думка, 1991. – 360 с.
2. Chaney L.W., McClenny W. A., ‘Unique Ambient Carbon Monoxide Monitor Based on Gas Filter Correlation: Performance and Application’, *Environmental Science and Technology*, 1977, – 11(13) – 1186 p.
3. Горелик, Д.О. Мониторинг загрязнения атмосферы и источников выбросов: Аэроаналитические измерения / Д.О. Горелик, Л.А. Конопелько. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 432 с.
4. REF: P.Middleton, *Internet J. Vib. Spec.* [www.ijvs.com] 5,3,3 (2001).
5. Беллами, А. Инфракрасные спектры сложных молекул / А. Беллами. – М.: Мир, 1963. – 120 с.
6. Hanst, P.L., ‘Spectroscopic Methods for Air Pollution Measurement’, in *Advances in Environmental Science and Technology*, 1971, – Vol.2, 91, Ed. Pitts, J. N., Metcalf R. L., John Wiley & Sons (New York).
7. Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия / А. Смит. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
8. Бреслер, П.И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение / П.И. Бреслер. – Л.: Энергия, 1980. – 164 с.
9. Герцберг, Е.Н. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул / Е.Н. Герцберг. – М.: Мир, 1980. – 197 с.
10. Немец, В.М. Спектральный анализ неорганических газов / В.М. Немец, А.А. Петров, А.А. Соловьев. – Химия, 1988 – 240 с.
11. Носов, Ю.Р. Оптоэлектроника / Ю.Р. Носов. – М.: Радио и связь, 1989. – 360 с.
12. Зуев, В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере / В.Е. Зуев. – М.: Советское радио, 1970. – 496 с.
13. Кузнецов Ю.Я. Методы спектрального анализа: учебное пособие /

Ю.Я. Кузнецов и др. – М.: Издательство МГУ, 1991. – 536 с.

14. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Лансберг. – М.: Наука, 1976.– 928 с.

15. Климков, Ю.М. Основы расчета оптикоэлектронных приборов с лазерами / Ю.М. Климков. – М.: Советское радио, 1978. – 264 с.

16. Аксененко, М.Д. Приемники оптического излучения: справочник / М.Д. Аксененко, М.Л. Баранчиков. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.

17. Источники и приемники излучения: Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов / Г.Г. Ишанин, Э.Д. Панков, А.А. Андреев, и др. – СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.

18. Полищук, Е.С. Измерительные преобразователи / Е.С. Полищук. – К.: Вища школа Головное издательство, 1981. – 293 с.

19. Жуйков, В.Я. Схемотехніка електронних систем: Підручник в двох томах / В.Я. Жуйков, В.І. Бойко, А.А. Зорі и др. – К.: Вища школа, 2003. – 772 с.

20. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под. ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. – 768 с.

21. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента: учебное пособие / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима. – К.: УМК ВО, 1991. – 124 с.

22. Барабашук, В.И. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко; под ред. Б.П. Креденцера. – К.: Техника, 1984. – 200 с.

23. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

24. Таланчук, П.М. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах: підручник / П.М. Таланчук, Ю.О. Скрипник, В.О. Дубровний. – К.: Райдуга, 1994. – 672 с.

25. Жидецький, В.Ц. Практикум із охорони праці / В.Ц. Жидецький та ін. – Л.: Афіша, 2000 – 349 с.

ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу й організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення в якому знаходиться робоче місце з ПК повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світопрорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світопрорізами. Віконні прорізи в приміщенні з ПК повинні мати регульовані жалюзі чи занавеси або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць із ПК у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з ПК рекомендується розміщати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з ПК повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування ПК, при якому працюючий звернений обличчям, або спиною до вікон чи кімнати задньої частини ПК, у яку монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень із ПК полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені в «Перелік дозволених , МЗ» 1977-1985 р.

В лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з ПК розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами складає 3 м. Екрани відеомоніторів ПК знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення (S=21 м², V=73,5 м³) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 метрів від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів відповідно. Робочий стілець оснащений

підйомно-поворотнім пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння і спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентильовання. Витрату повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаємо за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.; c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг); p – обсягова вага повітря (1,226 кг/м³); t_B – температура витяжного повітря (30°C); t_H – температура приточного повітря (20°C).

Розрахуємо надлишкове надходження тепла за наступною формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{УСТ}}$ – виділення тепла від устаткування; $Q_{\text{ПЕР}}$ – виділення тепла робітниками; $Q_{\text{ОСВ}}$ – надходження тепла від електричного освітлення; $Q_{\text{СР}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначимо виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{УСТ}} = P \cdot K_a \cdot K_{\theta} \cdot 860, \quad (\text{A.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год; K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95); K_o – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{уст} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_o \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначимо виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою наступної формули:

$$Q_{пер} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (A.4)$$

де n – кількість працюючих; g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначимо надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{осв} = E_M \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (A.5)$$

де E_M – нормована освітленість для цієї зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк; g_1 – питома тепловиділення на 1 м² підлоги при 1 лк освітленості (для / люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.) S – площа приміщення, м².

Визначимо надходження тепла від сонячної радіації через вікна за наступною формулою:

$$Q_{сп} = F \cdot g_2 \cdot K_{осл} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год,} \quad (A.6)$$

де F – площа віконних прорізів (3x2,5=7,5 м²); g_2 – кількість тепла, що

надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.); $K_{осл}$ – коефіцієнт ослаблення, приймаємо 0,4.

Визначимо кількість надлишкового тепла:

$$Q_{НАД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{ОСВ} + Q_{СР} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначимо витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{НАД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 куб. м./годину, що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати (22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та 40-60 % відповідно. При збереженні всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, рухливість повітря (0,1 – 0,2) метрів секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія при збереженні всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($h=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{стелі} = 70 \%$, $P_{стін} = 50 \%$. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, які підвищуються до стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначимо висоту підвісу світильників над підлогою

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути у межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. В лабораторії виміральної техніки та науково-дослідному відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначимо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,1 - 0,4 = 2,7 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається при відповідному співвідношенні відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначимо рекомендовану відстань між світильниками

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,7 = 1,9 \text{ м.}$$

4) Розрахуємо необхідну кількість світильників

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{2^2} = 6.$$

Приймаємо 6 світильників, враховуючи розміри приміщення розміщуємо їх у два ряди по 3 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника (Φ_L) визначається за формулою:

$$\Phi_L = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк; K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп; S – площа приміщення, що освітлюється, м²; Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15); N – кількість світильників; n – кількість ламп у світильнику; η – коефіцієнт використання світового потоку, який визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та коефіцієнтів відбиття стін та стелі.

6) Визначимо показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 (при $i = 2,5$, $P_{стелі} = 70\%$, $P_{стін} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обираємо лампу Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої становить 2100 лм. Хоча це значення на 18% більше розрахованого, однак не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{CB}} = P \cdot N = 150 \cdot 6 = 900 \text{ Вт.}$$