

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)

«___» _____ 2020 р.

Випускна кваліфікаційна робота

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи
викидів автомобільного транспорту»

Виконала: студентка 2 курсу, групи МІТЗм-18

(шифр групи)

спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Кайдаш Ганна Сергіївна

(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 – 2020 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 інформаційно-вимірювальної системи викидів
автомобільного транспорту»

Спецчастина: _____

Виконавець, студентка

гр. МІТзм – 18

_____Кайдаш Г.С.

(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 – 2020

**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.

« » 2020 року

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

Кайдаш Ганна Сергіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка та дослідження інформаційно-вимірвальної системи викидів автомобільного транспорту

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 04.02.2020 року № 67

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 вимірвального каналу; обґрунтування та розробка структури інформаційно-вимірвальної системи; розробка структурної та принципової схем мікропроцесорного блоку

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	Аналіз викидів автомобільного транспорту й обґрунтування необхідності контролю концентрації групи вуглеводнів		
2	Модель формування інформаційного сигналу концентрації вуглеводнів у автомобільному вихлопі		
3	Модель інформаційно-вимірювальної системи концентрації вуглеводнів		
4	Розробка структури ІВС викидів автомобілів		
5	Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві		

Студент

(підпис)

Кайдаш Г.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Вовна О.В.

(прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

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

АНОТАЦІЯ

Кайдаш, Г.С. Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи викидів автомобільного транспорту / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2020.

Пояснювальна записка: 77 стор., 36 рис., 6 табл., 30 посилань.

Розроблено математичну модель спектральних характеристик компонентів суми вуглеводнів, як об'єкта контролю, яка враховує зміну концентрації компонентів газової суміші, а також зміну температури й тиску аналізованої проби атмосферного повітря.

Розроблено математичну модель засобу вимірювання концентрації суми вуглеводнів, яка має в своєму складі модель оптичної схеми системи, та враховує втрати під час формування інформаційного сигналу системи з обліком впливу комплексу дестабілізуючих факторів.

Запропоновано якісно новий підхід щодо вимірювання концентрації суми вуглеводнів у вихлопних газах двигунів внутрішнього згорання автомобільного транспорту. На основі результатів роботи можлива побудова нових вимірювальних систем, які мають підвищені показники точності та швидкодії.

Ключові слова: концентрація, вуглеводні, вихлопні гази, вимірювання, точність, швидкодія, оптичний метод, підготовка проби.

ABSTRACT

Kaidash, H.S. Development and research of the information-measuring system of the road transport emissions / Graduation qualification work for obtaining an educational degree 'Master' in specialty 152 Metrology and information-measuring technique. – SHEI 'DonNTU', Pokrovsk, 2020.

Explanatory note: 77 p., 36 fig., 6 tables, 30 references.

A mathematical model of the spectral characteristics of the components of the sum of hydrocarbons is developed as an object of control, which takes into account the change in the concentration of the components of the gas mixture, as well as the change in temperature and pressure of the analyzed sample of atmospheric air.

A mathematical model of a tool for measuring the concentration of the sum of hydrocarbons, which has a model of the optical scheme of the system, is developed and takes into account the losses during the formation of the information signal of the system taking into account the influence of a complex of destabilizing factors.

A qualitatively new approach is proposed to measure the concentration of the sum of hydrocarbons in the exhaust gases of internal combustion engines of motor vehicles. Based on the results of the work, it is possible to build new measurement systems that have improved accuracy and performance.

Key words: concentration, hydrocarbons, exhaust gases, measurements, accuracy, speed, optical method, sample preparation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ВИКИДІВ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ Й ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГРУПИ ВУГЛЕВОДНІВ.....	12
1.1 Аналіз параметрів і характеристик викидів автомобільного транспорту.....	12
1.2 Обґрунтування вибору методу вимірювання концентрації вуглеводнів у вихлопах газів.....	16
1.2.1 Оптико-акустичний метод.....	16
1.2.2 Оптико-абсорбційний метод.....	18
1.2.3 Полум'яно-іонізаційний метод.....	19
1.3 Аналіз сучасних засобів вимірювання концентрації вуглеводнів.....	22
1.4 Обґрунтування вибору методу вимірювання концентрації вуглеводнів у вихлопах.....	29
2 МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО СИГНАЛУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕВОДНІВ У АВТОМОБІЛЬНОМУ ВИХЛОПІВ..	30
2.1 Математична модель суми вуглеводнів у автомобільних вихлопах....	30
2.2 Математична модель формування інформаційного сигналу.....	37
2.3 Оцінка метрологічних характеристик вимірювального каналу оптико-електронної системи.....	48
2.4 Висновки.....	
3 МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕВОДНІВ.....	51
3.1 Математичне моделювання оптичної системи.....	51
3.2 Математичне моделювання електронної частини ІВС.....	55
3.3 Моделювання алгоритмів обробки вимірювальних даних.....	57

3.4 Висновки.....	58
4 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ІВС ВИКИДІВ АВТОМОБІЛІВ.....	59
4.1 Вимоги до структури ІВС контролю вихлопних газів автомобільного транспорту.....	59
4.2 Розробка методики функціонування пристрою підготовки проби	59
4.3 Розробка схеми структурної ІВС концентрації вуглеводнів автомобільного транспорту.....	60
4.4 Оцінка метрологічних характеристик ІВС.....	62
4.5 Висновки.....	65
ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві.....	71

ВСТУП

Актуальність теми. Найсерйознішою екологічною проблемою багатьох промислових міст є забруднення атмосфери вихлопними газами автомобільного транспорту. Негативний вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення проявляється в скороченні середньої тривалості життя, а також збільшення кількості передчасних смертей, підвищення рівня захворюваності та негативний вплив на розвиток дітей. Вуглеводні, що утворюються під час неповного згоряння палива в двигунах внутрішнього згоряння автомобільного транспорту є небезпечними для навколишнього середовища та людини. Компоненти вихлопних газів вступають до реакції з оксидами азоту, при цьому утворюються більш шкідливі та небезпечні хімічні сполуки. Тому розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи викидів автомобільного транспорту є актуальною науково-технічною задачею.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності та швидкодії вимірювального контролю концентрації суми вуглеводнів у вихлопних газах автомобільного транспорту.

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

- проаналізувати викиди автомобільного транспорту й обґрунтувати необхідність контролю концентрації групи вуглеводнів;
- розробити модель формування інформаційного сигналу концентрації вуглеводнів у автомобільному вихлопі;
- виконати моделювання інформаційно-вимірювальної системи концентрації вуглеводнів;
- розробити структуру інформаційно-вимірювальної системи вихлопних газів автомобільного транспорту.

Об'єкт дослідження: процеси, що протікають у вимірювальних каналах суми вуглеводнів вихлопних газів автомобільного транспорту.

Предмет дослідження: методи та засоби підвищення точності та

швидкодії вимірювального контролю концентрації суми вуглеводнів у вихлопних газів автомобільного транспорту

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. Розроблено математичну модель спектральних характеристик компонентів суми вуглеводнів, як об'єкта контролю, яка враховує зміну концентрації компонентів газової суміші, а також зміну температури й тиску аналізованої проби атмосферного повітря.

2. Розроблено математичну модель засобу вимірювання концентрації суми вуглеводнів, яка має в своєму складі модель оптичної схеми системи, та враховує втрати під час формування інформаційного сигналу системи з обліком впливу комплексу дестабілізуючих факторів.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано якісно новий підхід щодо вимірювання концентрації суми вуглеводнів у вихлопних газах двигунів внутрішнього згорання автомобільного транспорту. На основі результатів роботи можлива побудова нових вимірювальних систем, які мають підвищені показники точності та швидкодії.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати кваліфікаційної роботи магістра одержані автором самостійно. Автором особисто розроблено: модель формування інформаційного сигналу концентрації вуглеводнів у автомобільному вихлопі; модель інформаційно-вимірювальної системи концентрації вуглеводнів; структура інформаційно-вимірювальної системи вихлопних газів автомобільного транспорту.

Апробація результатів роботи. Основні розділи роботи пройшли апробацію на наукових семінарах кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (м. Покровськ, 2018 – 2020 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 77 сторінок машинописного тексту, зокрема 67 сторінок основного тексту, 36 рисунків, 6 таблиць та список використаних джерел із 30 найменувань.

1 АНАЛІЗ ВИКИДІВ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ Й ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГРУПИ ВУГЛЕВОДНІВ

1.1 Аналіз параметрів і характеристик викидів автомобільного транспорту

У звичайних умовах СО – безбарвний, який не має запаху. СО легший ніж повітря, тому він легко поширюватися в атмосфері. Під час дії на людину СО викликає запаморочення, головний біль, швидку стомлюваність, сонливість, дратівливість, а також болі в області серця.

Оксид азоту (NO) – безбарвний газ, а двооксид азоту (NO₂) – газ, який має червоно-бурий колір та характерний запахом. Оксиди азоту під час попадання до організму людини з'єднуються з водою. Вони утворюють у дихальних шляхах з'єднання кислот – азотної та азотистої. Оксиди азоту діють дратівливо на слизові оболонки носа, очей та рота. Вплив NO₂ розвиває захворювання легенів.

Деякі вуглеводні (CH) – канцерогенні речовини, носіями яких можуть бути частинки сажі у відпрацьованих газах автомобільного транспорту. У повітрі з CH і NO_x, яке знаходиться над асфальтом, під дією впливу сонячного світла, мають місце хімічні реакції. Під час розкладання оксидів азоту утворюється озону. Цей газ не є стійким, він швидко розпадається. Розпад оксидів азоту не відбувається в присутності вуглеводнів CH. Вони сповільнюють цей процес. NO_x вступають активно до реакції з частинками вологи та ін. сполуками, що утворює стійку хмара мутного смогу. Викиди NO_x беруть участь під час формування кислотних дощів. Якщо застосовується етилований бензин, то близько 50% свинцю осідає на деталях двигуна та в вихлопній трубі у вигляді нагару, а залишок викидається до атмосфери. Свинець у вигляді найдрібніших частинок розміром від 1 до 5 мкм присутній в відпрацьованих автомобільних газах. Ці частинки довго зберігаються в

атмосфері. У придорожній смузі концентрація свинцю у (2–20) разів більше ніж в інших місцях. Наявність свинцю в повітрі викликає ураження центральної та периферичної нервової системи, а також органів травлення. Свинець впливає на кров людини шляхом руйнування еритроцитів та зниження кількості гемоглобіну [1 – 2].

Наявність хімічних сполук у повітрі робочої зони стають причиною підгострих і гострих хронічних отруєнь. Мають місце різні відхилень у стані здоров'я робітників, що може бути виявлено сучасними методами досліджень, які необхідно проводити протягом трудового стажу. Гранично-припустима концентрації (ГПК) у повітрі робочої зони визначено для тих сполук, концентрація яких в атмосфері є шкідливою для здоров'я людини.

У залежності від величини ГПК_{р.з.} та інших показників токсичності всі хімічні сполуки розділяють розділені на чотири класи небезпеки (див. табл. 1.1). Класи небезпеки дозволяє вибирати підходити до обґрунтування необхідності вимірювального контролю концентрації хімічних сполук у атмосфері [3]. У таблиці 1.2 представлено склад викидів автомобільного транспорту на бензиновому та дизельному двигунах.

Вуглеводні (СН) є органічними токсичні сполуками, в яких молекули побудовані на сонові атомів водню та вуглецю. Вихлопні гази міститься 200 і більше різних СН. Вони є на аліфатичні, які є закритим і відкритим ланцюгом, а також мають ароматичне або бензольне кільце. Ароматичні вуглеводні мають у молекулі одне або кілька циклів з 6 атомів вуглецю, з'єднаних між собою подвійними або простими зв'язками. Бензол, нафталін, антрацен та ін. мають приємний запах.

Вуглеводні C_xH_y це численна група сполук, які представляють такі гомологічні ряди: олефіни, парафіни, нафтени, ароматичні вуглеводні. Найбільше значення є легкі газоподібні вуглеводні так, як метан CH_4 , етан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , етилен C_2H_4 , ацетилен C_2H_2 та ін. На метан доводиться лише (2 – 6)%. Інші легкі СН мають не значну кількість у відпрацьованих газах дизелів і котлів [4].

Таблиця 1.1 – Класи небезпеки хімічних сполук

Показники	Клас небезпеки			
	1 (надзвичайно небезпечні)	2 (високо- небезпечні)	3 (помірно небезпечні)	4 (мало- небезпечні)
ГПКр.з., мг/м ³	менше 0,1	від 0,1 до 1	від 1 до 10	більше 10
ЛД ₅₀ під час введення до шлунку, мг/кг	менше 15	від 15 до 150	від 150 до 5000	більше 5000
ЛД _{50к} під час нанесення на шкіру, мг/кг	менше 100	від 100 до 500	від 500 до 2500	більше 2500
ЛК ₅₀ , мг/мл	менше 0,5	від 0,5 до 5	від 5 до 50	50
КВІО	більше 300	від 300 до 30	від 30 до 3	менше 3
З _{залиш}	менше 6	від 6 до 18	від 18 до 54	більш 54,0
З _{хр}	більше 10	від 10 до 5	від 5 до 2,5	менше 2,5

Таблиця 1.2 – Склад вихлопних газів автомобільного транспорту

Назва компонента	Бензиновий двигун	Дизельний двигун
N ₂ , об.%	від 74 до 77	від 76 до 78
O ₂ , об.%	від 0,3 до 8,0	від 2,0 до 18,0
H ₂ O, об.%	від 3,0 до 5,5	від 0,5 до 4,0
CO ₂ , об.%	від 0,0 до 16,0	від 1,0 до 10,0
CO, об.%	від 0,1 до 5,0	від 0,01 до 0,5
NO _x , об.%	від 0,0 до 0,8	від 0,0002 до 0,5
C _x H _x , об.%	від 0,2 до 3,0	від 0,09 до 0,5
C _x H _{2x} O, об.%	від 0,0 до 0,2	від 0,001 до 0,009
Сажа, г/м ³	від 0,0 до 0,04	від 0,01 до 1,10

У відпрацьованих газах двигунів СН присутні тому, що суміш є неоднорідною в камері згоряння. Поблизу стінок у зонах, де присутнє надзбагачення, має місце гасіння полум'я та обривання ланцюгових реакцій, що наведено на рис. 1.1, де позначено: 1 – поршень; 2 – гільза; 3 – пристінкові шари суміші.

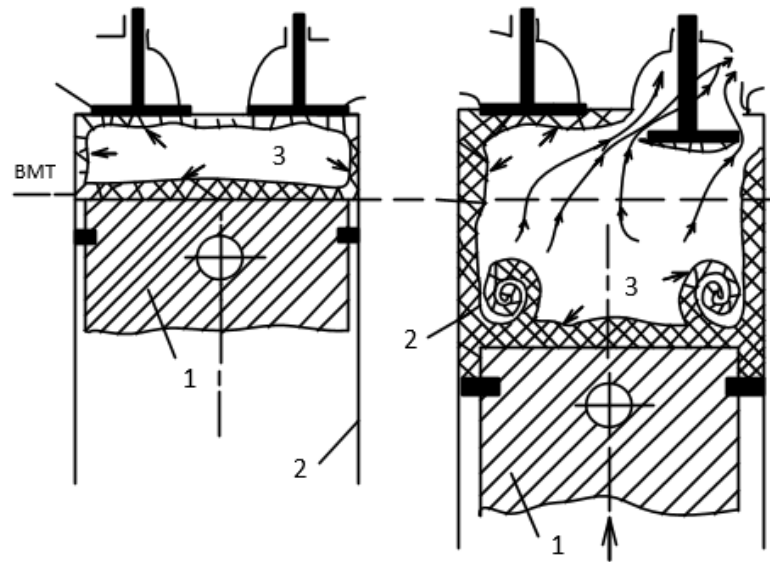


Рисунок 1.1 – Схема утворення вуглеводнів у вихлопних газах

Виділення СН обумовлено неповним згоранням поблизу холодних стінок. Якщо під час закінчення згоряння залишаються місця, які мають сильні локальні недоліки повітря з недостатньою для розпилювання палива, то у незадовільному завихренні повітряного заряду є низькі температури (наприклад, режим холостого ходу).

Вуглеводні утворюються під час обмеженого доступу кисню в надзбагачених зонах, а також біля стінок камери згоряння, які є порівняно холодними.

Вимірювання СН необхідно для аналізу процесу згоряння. Це дозволяє робити висновки щодо якості згоряння.

1.2 Обґрунтування вибору методу вимірювання концентрації вуглеводнів у вихлопах газів

1.2.1 Оптико-акустичний метод

Оптико-акустичний метод є спектрально-оптичним, який використовується для кількісного аналізу рідин і газів. Кількісний аналіз газів базується на використанні поглинання світла, яке описується законом Бугера-Ламберта-Бера. Потужність P монохроматичного випромінювання, яке має частоту ν проходить через середовище, що містить поглинаючий компонент (C):

$$P(\nu) = P_0(\nu) \cdot e^{-K(\nu) \cdot C \cdot l}, \quad (1.1)$$

де $P(\nu)$ – потужність випромінювання, що падає; $K(\nu)$ – коефіцієнт поглинання випромінювання газом; C – концентрація газу; l – відстань, яке проходить оптичне випромінювання.

Під час реєстрації потужності випромінювання $P(\nu)$ отримують значення вихідного сигналу, що пов'язано з концентрацією C вимірюваного газового компонента суміші. Для аналітичних цілей, зазвичай, використовують інфрачервону область спектру випромінювання з довжиною хвилі в діапазоні від 2 до 20 мкм. Практично всі гази мають в цій спектральній області спектри поглинання.

Основним елементом оптико-акустичного вимірювача концентрації газів є оптико-акустичний приймач (ОАП), завдяки його виконується реєстрація випромінювання, яке пройшло через середовище з аналізованим газом компонентом суміші. Приймач реєструє тільки оптичне випромінювання з частотою (або довжиною хвилі), яке зменшується під час наявності аналізованого компонента. Це досягається під час його заповнення газовою сумішшю з аналізованим компонентом. При попаданні оптичного

випромінювання в ОАП здійснюється збудження тільки молекул аналізованого компонента. Схему оптико-акустичного вимірювача концентрації газів наведено на рисунку 1.2.

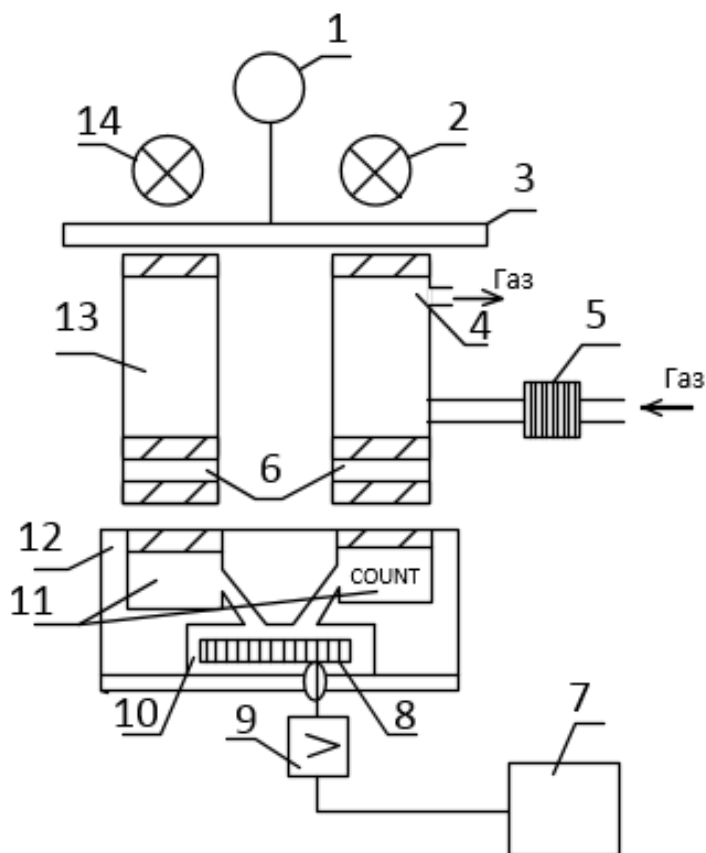


Рисунок 1.2 – Схема оптико-акустичного вимірювача концентрації газів

Обтюратором 3, що здійснює обертання синхронним двигуном 1, по черзі перериваються потоки інфрачервоного (ІЧ) випромінювання від джерел 2 і 14. Ці потоки проходять через порівняльну 13, робочу 4 та фільтрові 6 кювети, надходять до приймача випромінювання через циліндри ОАП 11 та 12. Циліндри заповнено досліджуванним газом у суміші з азотом. Пульсації тиску з частотою обтюрації, які утворюються в приймачеві, надходять до конденсаторного мікрофона 10, який має мембрану 8, перетворюються підсилювачем 9 до вихідного сигналу, який реєструється пристроєм 7.

Перед початком вимірюванням до робочої кювети надходить нульовий газ (азотом), кювета порівняння теж заповнена азотом. Оптичні потоки в робочому і порівняльному каналах будуть дорівнювати між собою. Вихідний

сигнал приймача буде дорівнює нулю, коливанні мембрани відсутнє. Під час надходження газової суміші, що аналізується, до робочої кювети здійснюється ослаблення потоку в робочому каналі та утворюється сигнал з ОАП, коливанні в мембрані присутнє. Наведена схема є диференціальної тому, що вихідний сигнал ОАП визначається як пропорційна різниця потужностей між порівняльним та робочим потоками. Ця схема має більш високу стабільність у порівнянні зі схемою з безпосереднім відліком, яка має один канал.

Крім диференціальних схем вимірювання застосовуються компенсаційні. У них ослаблення потоку в робочому каналі компенсується під час ослабленням потоку в канал порівняння. Ослаблення потоку в каналі порівняння здійснюється за допомогою неселективної діафрагми, яка є металевою заслінкою, у камері зі сумішшю газів, що має змінну товщину. Компенсаційна схема є більш стабільною у порівнянні з диференціальною. Вимірювача, які побудовані за компенсаційною, є більш трудомісткі під час виготовлення та складні в застосуванні.

1.2.2 Оптико-абсорбційний метод

Оптико-абсорбційний метод базується на вимірюванні під час поглинання випромінювання молекулами речовини, що аналізується, в спектральній області. Поглинання оптичного випромінювання описується формулою (1.1) та здійснюється під час збігання спектральних ліній оптичного випромінювання від джерела з лініями поглинання речовини, що аналізується. Кількість енергії, що поглинається, визначається кількістю молекул, а селективність поглинання забезпечується індивідуальними спектрами поглинання.

Схему оптико-абсорбційного вимірювача концентрації газів наведено на рис. 1.3. Наведена схема є реалізацію прямого абсорбційного методу. Оптичне випромінювання від джерела 1 проходить через фазову пластинку 2. Під час застосування дзеркала 3 випромінювання направляється до обтюратора 6, який

розділяє потік на опорний та вимірювальний. Опорний потік спрямований до фотоприймача 4, а вимірювальний потік відбивається від дзеркал 7 і 8, а також призми 9, надходить до багатоходової кювети 10, яка має аналізовану газову суміш. Після кювети потік надходить до фотоприймача 4, з виходу якого сигнал передається до вимірювального блоку 5. У цьому блоці здійснюється перетворення, а також порівняння сигналів опорного та вимірювального каналів.

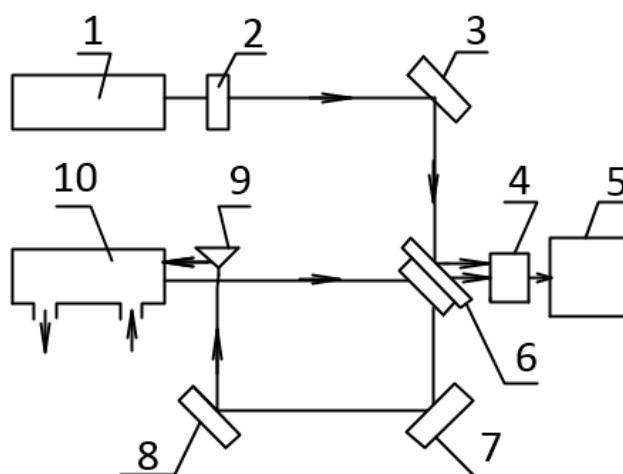


Рисунок 1.3 – Схема оптико-абсорбційного вимірювача концентрації газів

Під час аналізу газів за допомогою прямого абсорбційного методу величина похибки залежить від поглинання випромінювання газом, що аналізується. Також величина похибки визначається довжиною вимірювальної траси, стабільністю коефіцієнтів поглинання. Необхідно вибирати джерела випромінювання на основі поглинання всіма компонентами лінії спектра газу, що аналізується.

1.2.3 Полум'яно-іонізаційний метод

Полум'яно-іонізаційний метод базується на явищі іонізації вуглеводнів у водневому полум'ї. Під час дії чистого водневого полум'я вміст іонів є незначним. Під час введенні вуглеводнів до полум'я кількість іонів, яка

утворюються значно збільшується. Під час прикладання електричного поля між колектором і запальником виникає струм. Значення цього струму є прямо пропорційною від зміни концентрації вуглеводнів, що введено до полум'я. Число атомів вуглецю, які надходять до полум'я є мірою визначення струму. Вимірювання струму здійснюється за допомогою електрометричного підсилювача, до виходу якого підключено пристрій реєстрації. Полум'яно-іонізаційний детектор є іонізаційною камерою, до складу якої входить запальник полум'я, колекторний електрод, а також спіраль для запалення. Суміш водню з газом, що аналізується, надходить до запальника. До іонізаційної камери надходить повітря, яке необхідно для підтримки горіння полум'я.

Полум'яно-іонізаційний детектор (ПІД) не має селективності та формує вихідний сигнал, який має інформацію щодо суми вуглеводнів у повітрі. Вихідний сигнал полум'яно-іонізаційного вимірювача пропорційний кількості атомів вуглецю, які містяться в молекулі вуглеводню. Це дає можливість під час аналізу суми вуглеводнів визначати вихідне значення вимірювача в еквівалентній кількості однієї контрольної речовини, наприклад, пропану або метану.

Під час визначення вуглеводнів у повітрі суттєве значення має вимірювання суми вуглеводнів, які вступають до реакції з оксидами азоту та утворюють фотохімічний смог.

Для визначення загальної суми вуглеводнів в повітрі атмосфери за винятком метану (див. рис. 1.4) використовується диференційна схема полум'яно-іонізаційного детектування. У цій схемі є робота двох ПІД, які включені таким чином, що напрям струму в цих детекторах зустрічний.

Один ПІД виконує реєстрацію суми вуглеводнів разом з метаном, а інший – тільки метан. До підсилювача надходить сигнал різниці, значення якого відповідає значенню суми вуглеводнів без метану. Для роботи вимірювача концентрації газів необхідні три газових потоку: повітря, водень, а також газ, що аналізується. Блок підготовки газів 5 має елементи 6 – 8, які регулюють

газові потоки, фільтри, а також пристрої контролю тиску і витрат. Повітря та водень з балонів 2-4 через редуктори тиску надходять до входу блоку підготовки газів 5, а атмосферне повітря, що аналізується, від побудника витрат 1 до газового блоку.

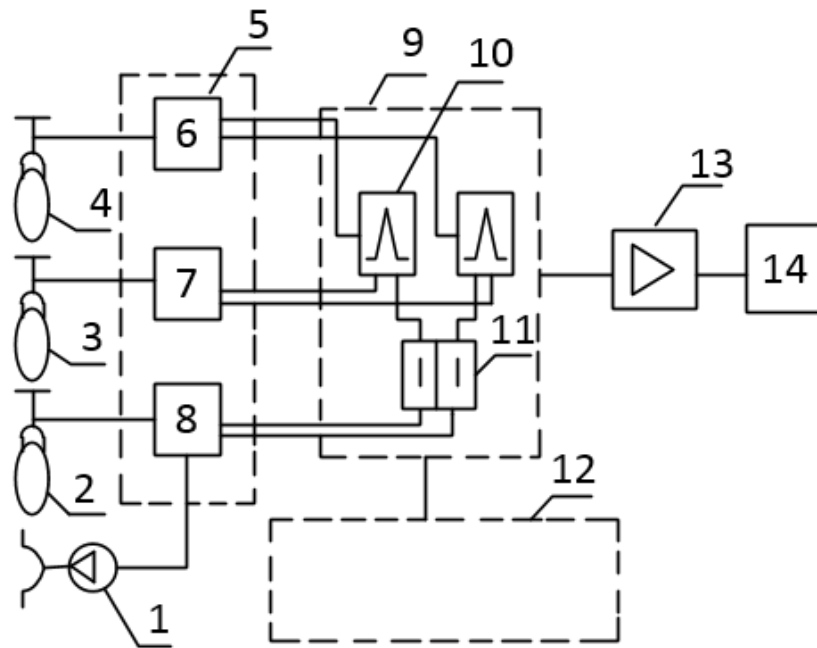


Рисунок 1.4 – Схема полум'яно-іонізаційного вимірювача концентрації газів

Газ для калібрування підключається до лінії газу, що аналізується, від балонів з атестованими сумішами або від установки, що здійснює динамічне калібрування. У блоці, що здійснює підготовку газів, кожен потік розділяється на два рівних за допомогою пневматичних опорів, що відградувано. Ці потоки передаються до двох датчиків ПД 10, які є датчиками вимірювача 9. Метан відділяється від іншої суми вуглеводнів у пристрої 11. Це пристрій є піччю, де встановлено дві колонки. У першій колонці має місце каталітичне окислення вуглеводнів, друга колонка є буферною, вона використовується для компенсації у каталітичній колонці пневматичного опору. Вимірювач концентрації газів має електронний блок 12, вторинний вимірювальний перетворювач 13, а також пристрій реєстрації 14.

1.3 Аналіз сучасних засобів вимірювання концентрації вуглеводнів

У теперішній час існує дуже велика кількість автомобільних вимірювачів концентрації газів, які мають різні параметри.

Автомобільний п'яти компонентний вимірювач концентрації газів Автотест-02.03.П, який має канал вимірювання NO_x . Цей вимірювач призначено для контролю токсичності всіх видів транспортних засобів. Зовнішній вигляд вимірювача концентрації газів Автотест-02.03.П наведено на рис. 1.5. Функції вимірювача АВТОТЕСТ-02.03 П:

- вимірювання концентрації газів: CO , CH , CO_2 , O_2 , NO_x ;
- розрахунок параметра λ ;
- автоматична корекція нуля без відключення пробовідбірника;
- вимірювання частоти обертів колінчастого валу, а також робочої температури моторного мастила;
- автоматична компенсація конденсату;
- отримання друкованого протоколу результатів вимірювань за допомогою принтера, що вбудований до вимірювача.



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд вимірювача концентрації газів
Автотест-02.03.П

Основні технічні й метрологічні характеристики Автотест-02.03.П наведено в таблиці 1.3

Таблиця 1.3 – Характеристики газоаналізатора Автотест-02.03.П

Назва	Од. вимір.	Значення
Діапазон вимірювання концентрації вуглеводню СН	млн ⁻¹	0-2000
Межі допустимої абсолютної похибки вимірювання СН	млн ⁻¹	± 12
Межі допустимої відносної похибки вимірювання СН	%	± 5
Діапазон вимір. концентрації оксиду вуглецю СО	%	0-5
Межі допустимої абсолютної похибки вимірювання СО	%	± 0,06
Межі допустимої відносної похибки вимірювання СО	%	± 4
Діапазон вимірювання вмісту двооксиду вуглецю СО ₂	%	0-16
Межі допустимої абсолютної похибки вимір. СО ₂		± 0.5
Межі допустимої відносної похибки вимір СО ₂	%	± 4
Діапазон вимірювання концентрації кисню О ₂	%	0-21
Межі допустимої абсолютної похибки вимір. О ₂		± 0.1
Межі допустимої абсолютної похибки вимір. NO _x .	млн ⁻¹	± 50
Діапазон вимірювання вмісту окислів азоту NO _x	млн ⁻¹	0-5000
Межі допустимої відносної похибки вимір. NO _x	%	± 5
Межі допустимої відносної похибки вимір. О ₂	%	± 4
Діапазон вимірювання параметра λ		0,50-2,00
Діапазон вимірювання частоти обертання	хв ⁻¹	0-8000
Вимірювання температури масла	° С	20-125
Витрата аналізованого газу, не менше	л/г	60
Час встановлення вимірювальних значень, не більше	сек.	60
Час встановлення робочого режиму, не більше	хв.	30
Електроживлення через БП від мережі змінного струму	В	220 ± 22
Електроживлення від мережі постійного струму	В	12,6 ± 2

Продовження табл. 1.3

Назва	Од. вимір.	Значення
Діапазон робочих температур	° C	0-40
Буквено-цифровий дисплей 2x16 знаків з підсвічуванням		2
Автоматична компенсація та конденсату		так
Автоматичне відключення проби		так
Автоматична корекція чутливості за опорним каналом 3,9 мКм		так
Датчик компенсації коливань атмосферного тиску		немає
Вбудований принтер		так
Порт RS-232		так
Робота зі спеціалізованим ПО «АВТОТЕСТ»		так

Автомобільний вимірювача типу Інфралайт 11П, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 1.6, призначено для вимірювання концентрації газів CO, CH, CO₂, O₂ у відпрацьованих газах автомобільного транспорту. Також пристрій здійснює вимірювання числа обертів двигуна та значення коефіцієнта ефективності згоряння (λ).



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд вимірювача концентрації газів
Інфралайт 11П

Мікропроцесорна система вимірювача може спільно працювати з персональним комп'ютером, центром діагностики або автономно роздруковувати результати на принтері. Вимірювач Інфралайт11П має сучасну систему фільтрації. Також має можливість автоматично виділяти конденсат та здійснювати автоматичне калібрування чутливості та нуля.

Під час роботи в комплекті з пристроєм контролю задимлення типу LSC вимірювач дозволяє виконувати вимірювання даних щодо задимлення в реальному масштабі часу. Пристрій дозволяє виконувати тест в автоматичному режимі та оцінювати достовірність результатів. Пристрій вимірювального контролю задимлення може працювати як спільно з вимірювачем концентрації газів, так і автономно. Технічні й метрологічні характеристики вимірювача концентрації газів Інфралайт 11П наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Технічні й метрологічні характеристики вимірювача концентрації газів Інфралайт 11П

Вимірюваний компонент	Діапазон вимірювання	Межа основної похибки
СН за гексаном	від 0 до 2000 ppm	± 12 ppmабс. $\pm 5 \%$.
	від 2000 до 5000 ppm	$\pm 5 \%$.
СО	від 0 до 5 ^{об.} %	± 0.06 ^{об.} % $\pm 4 \%$
	від 5 до 10 ^{об.} %	$\pm 5 \%$
СО ₂	від 0 до 16 ^{об.} %	± 0.5 ^{об.} % $\pm 4 \%$
NO _x	від 0 до 1000 ppm	± 50 ppm.
	від 1001 до 2000 ppm	$\pm 5 \%$
Число обертів	від 500 до 1000 об./хв.	± 10 об./хв.
	від 1000 до 9999 об./хв.	$\pm 2 \%$

Універсальний переносний вимірювач концентрації газів Експерт, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 1.7, призначено для визначення концентрації забруднюючих речовин у викидах промислових установках, що спалюють паливо. Вимірювач створено для виконання державного та виробничого або технологічного налаштування установок для оптимізації процесу горіння палива.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд універсального вимірювача концентрації газів Експерт

Універсальний вимірювач Експерт дозволяє одночасно виконувати контроль концентрації всіх основних речовин, що утворюються під час горіння органічного палива: CH_4 , CO , CO_2 , O_2 , SO_2 , NO_x , H_2S . Також вимірювач визначає температуру, тиск атмосфери, швидкість і об'ємні витрати потоку газу в точці збору проби. Він контролює технологічні параметри установки: коефіцієнт втрат тепла, коефіцієнт надлишку повітря (α) та к.к.д. установки.

Вимірювач виготовляється в шести базових модифікаціях. Ця модифікації переліком компонентів, що вимірюються, діапазонами та похибками вимірювання. Застосування модульної конструкції у вимірювачі дозволяє змінювати та комплектувати пристрій у залежності від задач вимірювання. Конструкція вимірювача має міцний корпус, на лицеву панель його розташовано клавіатуру, дисплей, принтер, а також з'єднувальні роз'єми. Інформація виводиться до дисплею, який має світлодіодне підсвічування. Живлення вимірювача може здійснюватися як від мережі змінної напруги, так і від внутрішнього акумулятора.

До складу вимірювача входить комплект оптичних і електрохімічних сенсорів для вимірювання концентрації газових компонент. Також пристрій має термоелектричний перетворювач для визначення температури, мембранний сенсор для визначення тиску, а також трубки Піто, які призначено для вимірювання швидкості потоку газу.

Завдяки використанню двох електрохімічних сенсорів, які мають різні діапазони за кожним з каналом вимірювання, пристрій Експерт має кращі метрологічні характеристиками в областях вимірювання низьких, середніх і високих концентрацій. Для області низьких концентрацій сумарна відносна похибка не перевищує $\pm 25\%$.

Результати вимірювання концентрації компонентів можуть бути представлено на дисплеї як у об'ємних відсотках, так і в ppm. Представлення в мг/м^3 приводиться до нормальних умов або коригуються відносно точки відліку O_2 . Під час друку протоколу вимірювання результати представляються у всіх трьох одиницях одночасно.

Основні технічні характеристики вимірювача концентрації газів Експерт наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Основні технічні характеристики вимірювача Експерт

Вимірюваний компонент / параметр	Принцип вимірювань	Діапазон вимірювань	Похибка вимірювань
O ₂	електрохімічний сенсор	від 0 до 21 ^{об.} %	± 0,2 ^{об.} %
CO	електрохімічний сенсор	від 0 до 10000 мг/м ³	± 5 г/м ³ або ± 5 %
NO	електрохімічний сенсор	від 0 до 5000 мг/м ³	± 5 мг/м ³ або ± 5 %
NO ₂	електрохімічний сенсор	від 0 до 200 мг/м ³	± 5 мг/м ³ або ± 5%
SO ₂	електрохімічний сенсор	від 0 до 10000 мг/м ³	± 5 г/м ³ або ± 5%
CH за метаном	оптичний сенсор	від 0 до 5000 мг/м ³	± 25 мг/м ³ або ± 5%
Температура газового потоку	термопара	від -20 до + 800 °C	± 2 °C або ± 2%
Температура навколишнього середовища	терморезистор	від 0 до + 50 °C	± 1 °C
Надмірний тиск потоку газу	мембранний датчик	± (0 – 50) гПа	± 0,2 гПа або ± 2%
Швидкість потоку газу	трубка Піто	від 4 до 50 м/с	± 2 м/с

1.4 Обґрунтування вибору методу вимірювання концентрації вуглеводнів у вихлопах

Діапазон вимірювання концентрації метану оптико-акустичним методом становить – 10^{-6} мол. %. Цей метод широко використовується під час аналізу складних газових сумішей, а також для визначення концентрацій мікродомішок у середовищі з газом. Недоліком оптико-акустичного методу є те, що він має велике значення додаткових похибок, які мають місце під час зміни температури та атмосферного тиску. Також до недоліків слід віднести високу чутливість методу до промислових вібрацій.

Діапазон вимірювання концентрації метану оптико-абсорбційним методом становить – $6 \cdot 10^{-8}$ мол. %. Під час аналізу газу оптико-абсорбційним методом величина похибки залежить від ступеня поглинання оптичного випромінювання газом, що аналізується. Також величина похибки визначається стабільністю коефіцієнтів поглинання та довжиною кювети. Вибірковість методу залежить від ступеня накладення смуг поглинання аналізованих компонентів суміші.

Полум'яно-іонізаційний метод виконує визначення концентрації метану в діапазоні до 10^{-7} мол.%. До переваг цього методу необхідно віднести широкий лінійний динамічний діапазон, швидкий відгук, а також універсальність. До основних недоліків вимірювачів, які побудовано на цьому методі, можна віднести низьку вибірковість до окремих органічних компонентів, які присутні в аналізованій газовій суміші.

Під час застосування газової хроматографії можна визнати концентрацію метану до 10^{-7} мол. %. Перевагами зазначеного методу є висока селективність компонентів, що вимірюються в сумішах газів. До основного недоліку цього методу відносять тривалий час проведення вимірювання [8].

Як метод, який встановлений в основу інформаційно-вимірювальної системи, є оптико-абсорбційний метод. Його реалізація достатньо проста, вимірювачі на його основі мають високу швидкодію та чутливість.

2 МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО СИГНАЛУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕВОДНІВ У АВТОМОБІЛЬНОМУ ВИХЛОПІВ

2.1 Математична модель суми вуглеводнів у автомобільних вихлопах

Для побудови інформаційно-вимірювального каналу суми вуглеводнів у вихлопах автомобільного транспорту визначається смуга поглинання суми вуглеводнів. До газових компонентів суми вуглеводнів у вихлопах автомобільного транспорту відносяться метан CH_4 , ацетилен C_2H_2 , етан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , пентан C_5H_{12} та гексан C_6H_{14} .

За допомогою програми, яка виконує моделювання спектральних характеристик хімічних сполук, Nitranspectra отримані моделі спектральних характеристик основних складових суми вуглеводнів [9,10]. На рисунку 2.1 наведено спектральну характеристику поглинання випромінювання метаном (CH_4). На рисунку 2.2 наведено спектральну характеристику поглинання випромінювання ацетиленом (C_2H_2). На рисунку 2.3 наведено спектральну характеристику поглинання випромінювання етан (C_2H_6). На рисунку 2.4 наведено спектральну характеристику поглинання випромінювання пропаном (C_3H_8). На рисунку 2.5 наведено спектральну характеристику поглинання випромінювання бутаном (C_4H_{10}). На рисунку 2.6 наведено спектральну характеристику поглинання випромінювання пентаном (C_5H_{12}). На рисунку 2.7 наведено спектральну характеристику поглинання випромінювання гексаном (C_6H_{14}).

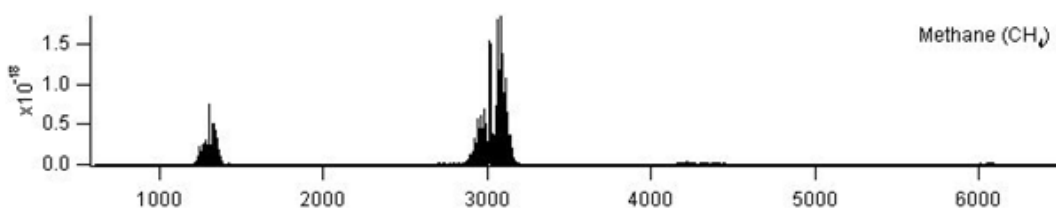


Рисунок 2.1 – Спектральна характеристика поглинання оптичного випромінювання метаном (CH_4)

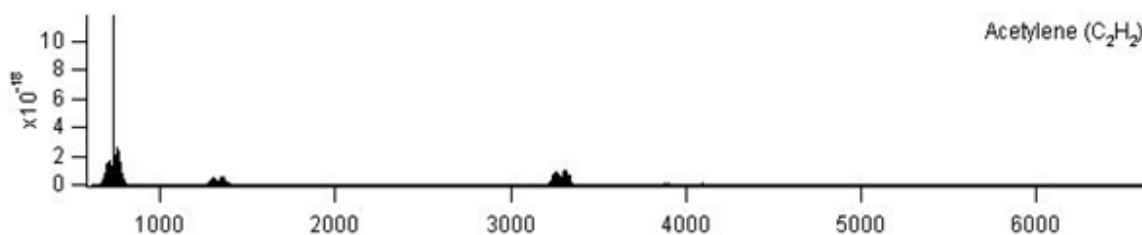


Рисунок 2.2 – Спектральна характеристика поглинання оптичного випромінювання ацетиленом (C_2H_2)

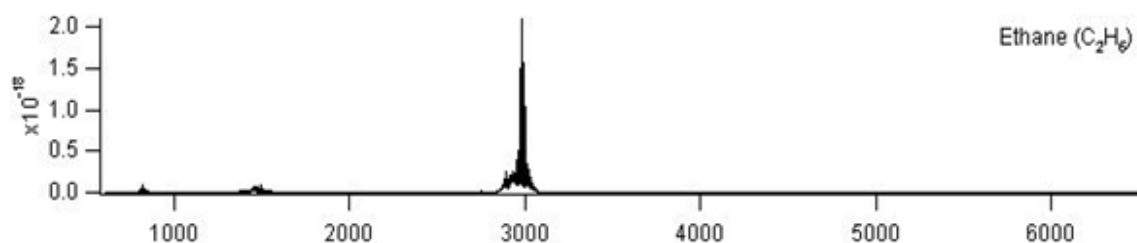


Рисунок 2.3 – Спектральна характеристика поглинання оптичного випромінювання етаном (C_2H_6)

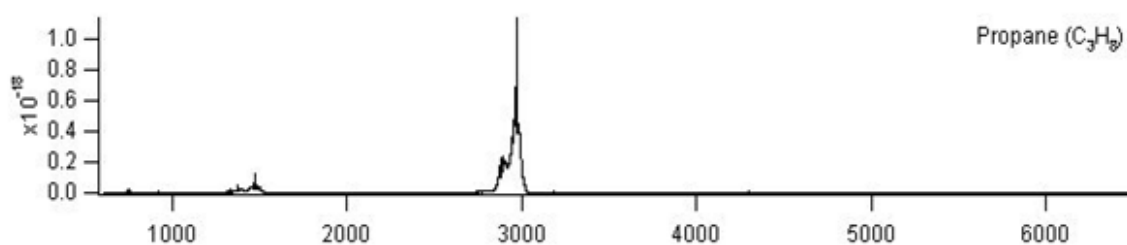


Рисунок 2.4 – Спектральна характеристика поглинання оптичного випромінювання пропаном (C_3H_8)

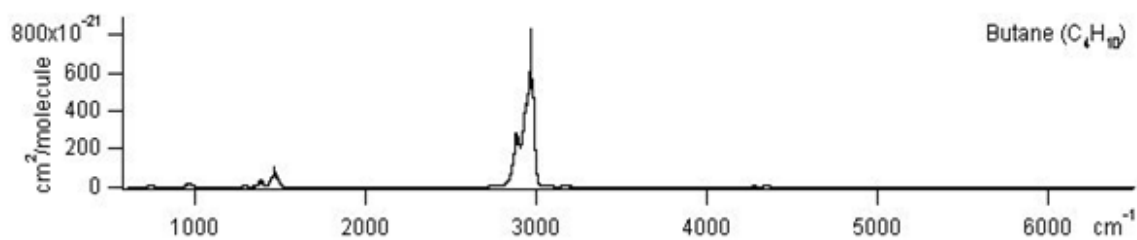


Рисунок 2.5 – Спектральна характеристика поглинання оптичного випромінювання бутаном (C_4H_{10})

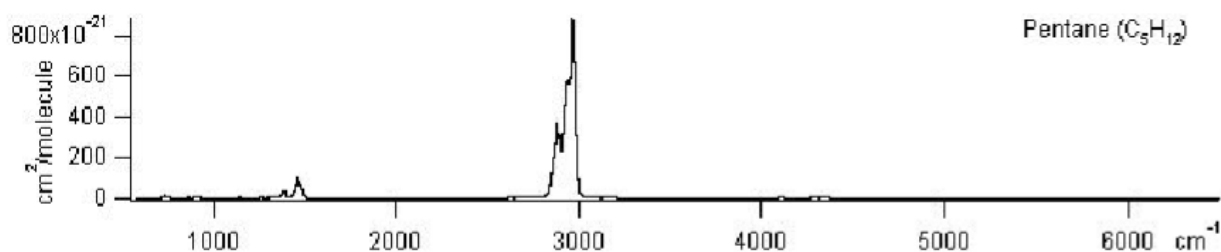


Рисунок 2.6 – Спектральна характеристика поглинання оптичного випромінювання пентаном (C_5H_{12})

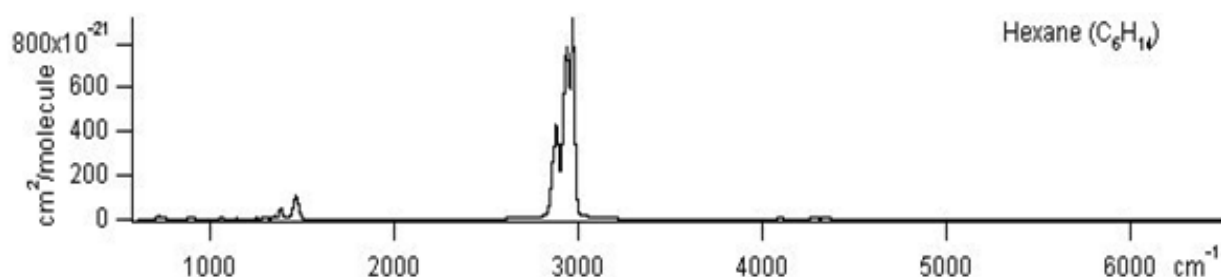


Рисунок 2.7 – Спектральна характеристика поглинання оптичного випромінювання гексаном (C_6H_{14})

У відповідності з експериментальними даними щодо молекулярного поглинання спектр метану має складну структуру. Перетин поглинання спектра CH_4 у ІЧ-області наведено на рисунку 2.1. Він отриманий з високою роздільною здатністю аналізатора. Цей спектр має спектральні смуги, що містять електронно-коливально-обертальні компоненти, а також їх комбінаційні складові. Ці складові відрізняються інтенсивністю поглинання та місцем положення в спектральній області.

Найбільш інтенсивна коливально-обертальна смуга перетину поглинання метану знаходиться в області з центральною довжиною хвилі випромінювання $\lambda_0 = 3,31$ мкм (див. рис. 2.8).

У інфрачервоній області є коливально-обертальні смуги поглинання оптичного випромінювання. Ці смуги є послідовностями ліній поглинання. Контур цієї лінії визначається під час міжмолекулярними зіткненнями та описується такою функцією:

$$K_i(\lambda) = \frac{a_i}{\pi} \cdot \frac{\delta_i}{(\lambda - \lambda_{0i})^2 + \delta_i^2}. \quad (2.1)$$

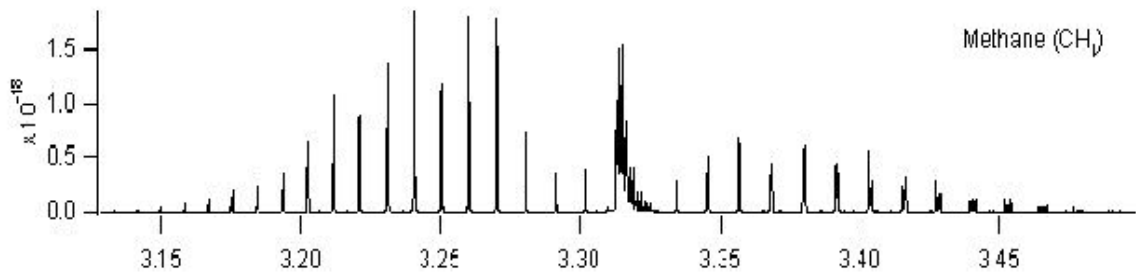


Рисунок 2.8 – Найбільш інтенсивна смуга поглинання оптичного випромінювання метаном

Спектр структури має характер довго- та короткохвильових неповністю симетричних крил, а також центральної обертальної складової коливально-обертальні смуги поглинання. Це може бути представлено послідовністю ліній поглинання. Контур кожної з ліній визначається під час міжмолекулярного співударяння та описується коефіцієнтом поглинання смуги. Зазначений коефіцієнт виражається як сума коефіцієнтів поглинання від окремих ліній:

$$K(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} K_i(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i}{\pi} \cdot \frac{\delta_i}{(\lambda - \lambda_{0i})^2 + \delta_i^2}. \quad (2.2)$$

З аналізу найбільш інтенсивної смуги поглинання оптичного випромінювання метаном (див. рис. 2.8) видно, що перетин оптичного поглинання в області 3,31 мкм дорівнює $1,8 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{молекула}$. Для розрахунку інтегральної інтенсивності лінії визначену величину помножують на число Авогадро ($6,0221415 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$). Отже величина інтегральної інтенсивності визначається за формулою:

$$a_i = K(\lambda_i = \lambda_{0i}) \cdot \pi \cdot \delta_i \cdot N_A. \quad (2.3)$$

Для розрахунку ряду введено такі допущення щодо характеру зміни a_i та δ_i у межах коливально-обертальної смуги. Бреслер П.І. аналізував смугу поглинання як нескінченну послідовність ідентичних за напівшириною та інтенсивністю рівновіддалених ліній. Для спрощення розрахунків використано модель смуги поглинання, де рівновіддалені лінії мають рівну напівширину, розподіл інтенсивності в кожній з гілок смуги відповідає розподілу молекул за обертовими рівнями енергії [11]. Середньоквадратичне значення похибки апроксимації не перевищує 5%. Нормовану огинаючу спектра смуги поглинання оптичного випромінювання метаном наведено на рисунку 2.9.

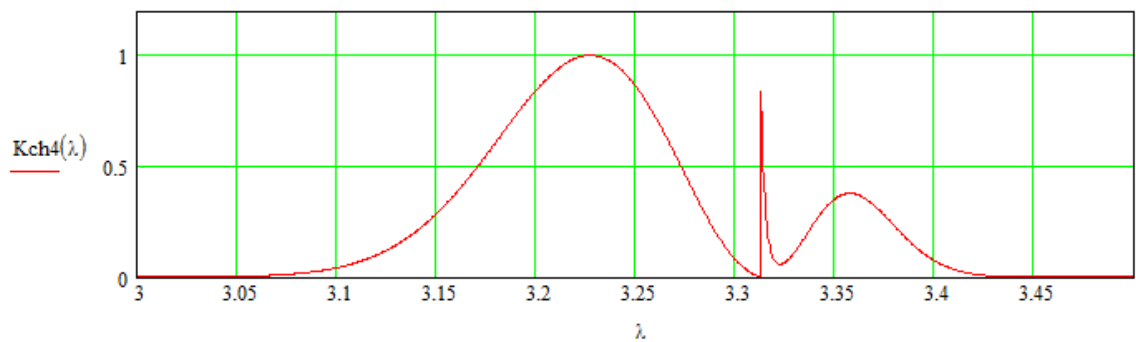


Рисунок 2.9 – Нормована огинаюча спектра смуги поглинання оптичного випромінювання метаном

Залежність зміни напівширини лінії поглинання для метану від тиску та температури описується наступною залежністю:

$$b(P, T) = b_0 \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T} \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.9}}, \quad (2.4)$$

де P – тиск газу під час вимірювання концентрації метану; P_0 – тиск газу за нормальних умов; T – температура газу під час вимірювання концентрації метану; T_0 – температура газу за нормальних умов.

Під час моделювання отримано графік інтегрального спектра поглинення смуги 3,31 мкм метану, який наведено на рисунку 2.10. Непропорційні зміни середньої гілки пов'язано з високим рівнем скупчення ліній поглинання метану в цій гілці.

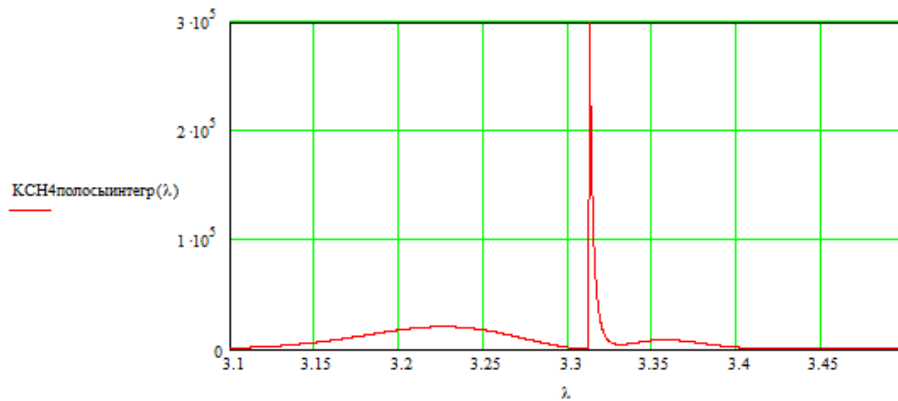


Рисунок 2.10 – Інтегральний спектр поглинання смуги 3,31 мкм метану

Під час порівняльних випробування інтегральної та спектральної моделей спектра поглинання оптичного випромінювання метаном зведено до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані порівняльних випробувань інтегральної та спектральної моделей спектра поглинення оптичного випромінювання метаном

C, %	Інтегральна модель	Спектральна модель	Приведена похибка δ , %
	$\Phi_{\text{сигналу}}$, мВт		
2,5	0,0476	0,0469	1,3
0,25	0,0497	0,0494	0,5
0,1	0,0498	0,0496	0,4

Інформаційну складову вихідного потоку сигналу оптичного каналу під час застосування інтегральної та спектральної моделей визначено як величина потоку, що надійшов до вікна фотоприймача. Величина відносної похибки

результатів моделювання оптичних сигналів визначена як різниця між сигнальними потоками в спектральній та інтегральній моделі, що приведено до потоку сигналу спектральної моделі.

Якщо точність відповідної моделі експериментальним даним складає не більш 5 %, то моделі вважаються рівноточними. Використання інтегральної моделі спектру поглинання метану оптичного випромінювання виявляється більш ефективним. Часовий інтервал для моделювання процесів формування інформаційних сигналів з інтегральною моделлю спектру поглинання оптичного випромінювання метаном є втричі менший у порівнянні зі спектральною моделлю [12].

Результати отримано для інтегральної моделі метану, проте інтегральна модель може бути успішно застосована під час описанні вимірювальних перетворень усієї суми вуглеводнів у викидах автомобільного транспорту.

Інтегральна модель спектрів поглинання оптичного випромінювання для неорганічних газів використовується для моделювання процесів під час формування інформаційних сигналів більше ефективна у порівнянні з спектральною моделлю, яка має детальний опис структури спектру.

Інтегральна модель у порівнянні зі спектральною істотно зменшує час розрахунку під час моделювання процесів, які дозволяють сформувати вихідні інформаційно-вимірювальні сигнали від газоаналітичних засобів вимірювання.

Виконано моделювання інтегральних характеристик основних компонентів суми вуглеводнів. Під час виконаних досліджень отримано математичні моделі інтегральних спектрів поглинання метану (CH_4), ацетилену (C_2H_2), етану (C_2H_6), пропану (C_3H_8), бутану (C_4H_{10}), пентану (C_5H_{12}) та гексану (C_6H_{14}). Отримані спектри використовуються під час моделювання формування аналітичного інформаційно-вимірювального сигналу концентрації суми вуглеводнів в оптичній схемі вимірювача.

2.2 Математична модель формування інформаційного сигналу

Інформаційно-вимірвальна система, що розробляється, основана на базі оптико-абсорбційного методу визначення концентрації суми вуглеводнів у вихлопних газах автомобільного транспорту. Кількісний аналіз газів, який виконується на основі зазначеного метода, ґрунтується на використанні поглинання світла, що описуваного законом Бугера-Ламберта-Бера (1.1). Аналітична проба газу повинна знаходитися в кюветі, яка має довжину l . Через цю кювету проходить оптичний потік випромінювання. Це потік частково поглинається пробою. Частина потоку, що не поглинається газовим середовищем, потрапляє до фотоприймача. На основі формули (1.1) визначається потужність оптичного випромінювання, що потрапило до вікна фотоприймача.

Схему оптичну вимірвального каналу концентрації суми вуглеводнів у вихлопних газах двигунів внутрішнього згорання наведено на рисунку 2.11.

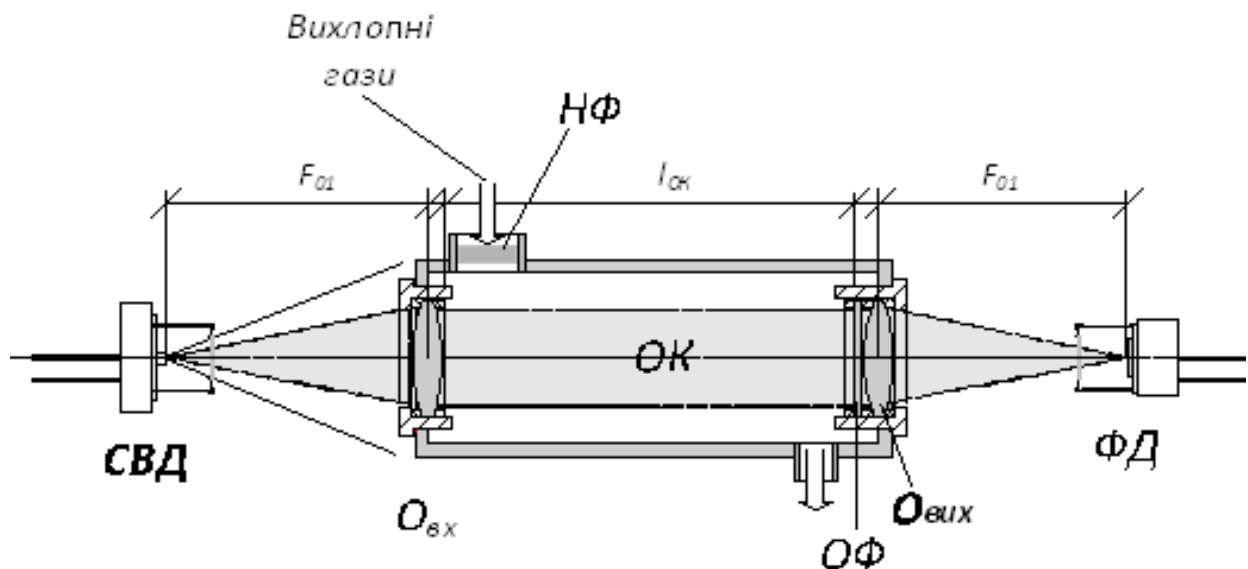


Рисунок 2.11 – Оптична схема каналу вимірювання концентрації суми вуглеводнів

До оптичного каналу (ОК) через фільтр (НФ) подаються вихлопні гази двигуна внутрішнього згорання. Оптичне випромінювання від світловипромінюючого діода (СВД) проходить через вхідну лінзу O_{BX} , яка збирає оптичний потік випромінювання, до ОК, де здійснюється часткове поглинається оптичного випромінювання вихлопними газами. Частина оптичного випромінювання, яку не поглинуло вихлопні гази, проходить через лінзу $O_{ВИХ}$, а потім направляється до вікна фотоприймача (ФД). Під час обробки вихідного електричного сигналу від фотоприймача, отримують інформацію щодо зміни концентрації вимірюваного компоненту газової суміші [13,14].

Усі вуглеводні поглинають оптичне випромінювання в спектральній області 3,3 мкм, то СВД повинен мати центральну довжину хвилі, яка охоплює центр поглинання вуглеводнів. Як СВД в роботі використовується діод типу LED34, який має наступні технічні характеристики:

- пікова довжина хвилі випромінювання, мкм 3,4;
- смуга пропускання (FWHM), мкм 0,1;
- номінальна потужність потоку випромінювання, мВт 0,02;
- час реакції, нс 100;
- температурний дрейф смуги, нм/К 2.

Спектральну характеристику потужності оптичного випромінювання СВД типу LED34 наведено на рис. 2.12

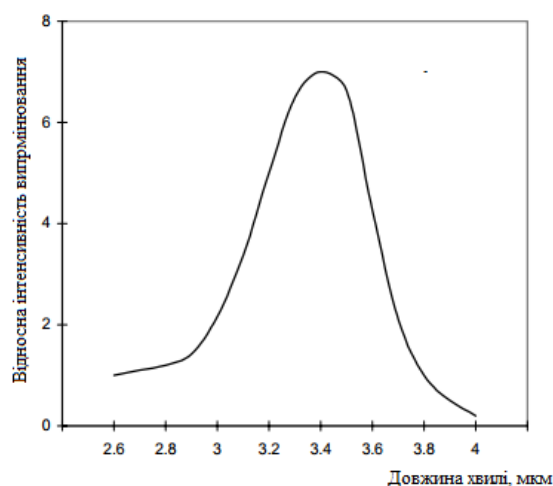


Рисунок 2.12 – Спектральна потужності оптичного випромінювання СВД типу LED34

Спектральна щільність потоку оптичного випромінювання від СВД визначається наступною залежністю:

$$S_{СВД}(\lambda) = S_{0СВД} \cdot e^{-r_{СВД}^2 (\lambda - \lambda_{0\epsilon})^2}, \quad (2.5)$$

де $r_{СВД}$ – параметр спектральної щільності оптичного випромінювання від СВД, який розраховується за формулою:

$$r_{СВД} = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\Delta\lambda_{\epsilon}}, \quad (2.6)$$

де $\Delta\lambda_{\epsilon}$ – напівширина спектральної щільності оптичного випромінювання від СВД.

Максимальне значення спектральної щільності потоку оптичного випромінювання $S_{СВД}(\lambda)$, якщо $\lambda = \lambda_{0\epsilon}$ розраховується за такою формулою:

$$S_{0СВД} = \frac{r_{СВД} \cdot \Phi_{0B}}{\sqrt{\pi}}, \quad (2.7)$$

де Φ_{0B} – номінальне значення потужність оптичного потоку випромінювання.

Спектральну щільність оптичного потоку випромінювання від СВД наведено на рисунку 2.13.

До складу оптичної системи входить одноелементний об'єктиви SCA-IR-3.5-F4, який виробляється фірмою «Servo Corporation of America». Ці об'єктиви мають такі параметри:

- | | |
|--------------------------------------|-----------------|
| – робочий діапазон довжин хвиль, мкм | від 2,0 до 5,0; |
| – розрахункова довжина хвилі, мкм | 3.5; |
| – фокусна відстань, F , мм | 19; |
| – відношення F/D | 1; |

- розрахунковий діаметр розсіювання, мм 0,610;
- робочий діаметр розсіювання, мм 0,686;
- матеріал лінзи сервофракс.

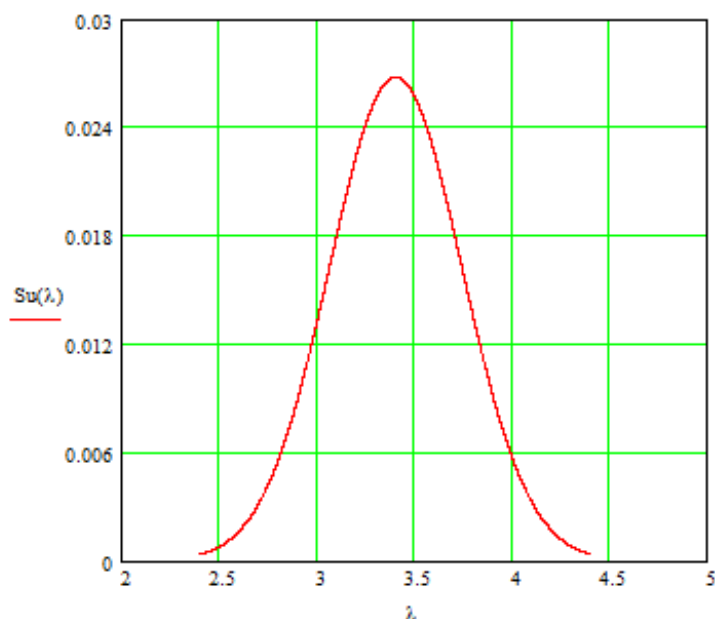


Рисунок 2.13 – Спектральна щільність оптичного потоку випромінювання від СВД

Необхідно розрахувати оптичний потік випромінювання, величина якого потрапляє до вікна вхідного об'єктива. На рисунку 2.14 наведено зображення потік від точкового джерела, який обмежено центральним кутом α .

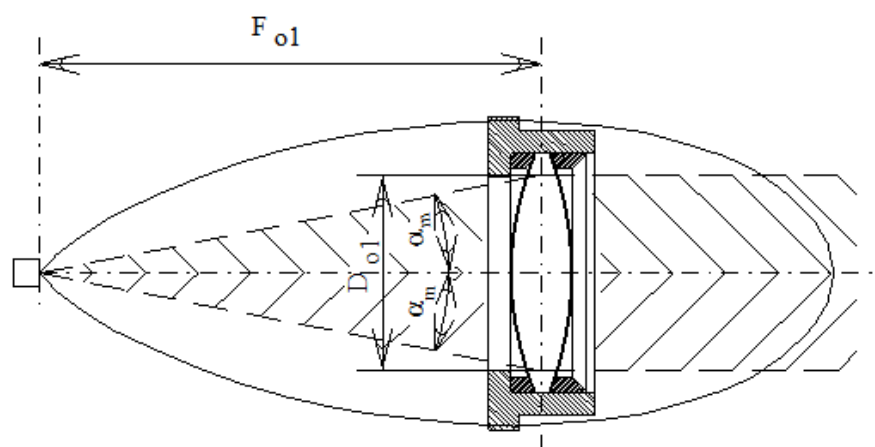


Рисунок 2.14 – Оптичний потік випромінювання від точкового джерела, який обмежено центральним кутом α

Визначимо величину кута введення оптичного випромінювання до об'єктива:

$$\alpha_{\max} = a \tan\left(\frac{D_{\text{об}}}{2 \cdot F_{\text{об}}}\right) = 26,6^\circ. \quad (2.8)$$

Ефективність введення оптичного випромінювання до об'єктива O_{BX} визначається коефіцієнт введення, значення якого розраховується за формулою:

$$K_{BB} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha_{\max}} J_n \cdot z(\varphi) \cdot \frac{\tan(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{2} d\varphi d\beta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} J_n \cdot z(\varphi) \cdot \frac{\tan(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{2} d\varphi d\beta} = 0,99. \quad (2.9)$$

Коефіцієнт пропускання $T_{O_{\text{вх}}}$ об'єктива O_{BX} визначається значеннями параметрів об'єктива та дорівнює 0,92. Потік оптичного випромінювання, що надійшов до ОК визначається за наступною формулою:

$$\Phi_{BX \text{ ОК}} = \Phi_{0\text{в}} \cdot K_{\text{вв}} \cdot T_{O_{\text{вх}}} = 22 \text{ мкВт}. \quad (2.10)$$

Визначимо значення параметрів поглинання оптичного потоку випромінювання в ОК. Зміна однорідного та монохромного оптичного потоку випромінювання, що проходить через аналізовану речовину описується законом Ламберта-Бугера:

$$\Phi(l) = \Phi_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l}, \quad (2.11)$$

де Φ_0 – оптичний потік випромінювання на межі речовини, що аналізується; α – показник поглинання; l – довжина траси оптичного випромінювання в речовині,

що аналізується.

Величина оптичної щільності речовини встановлюється за законом Беєра у наступному вигляді:

$$D_{C_xH_y} = \alpha_{C_xH_y} \cdot l = k_{C_xH_y} \cdot C_{C_xH_y} \cdot l, \quad (2.12)$$

де $C_{C_xH_y}$ – концентрація газової компоненти, що поглинає оптичне випромінювання; $k_{C_xH_y}$ – питомий коефіцієнт поглинання.

Процес поглинання оптичного випромінювання залежить від частоти та визначається функцією інтегрального коефіцієнта поглинання наступним чином:

$$K_{int}(\lambda) = K_{max} \cdot 2,718 \cdot \frac{9 \cdot (\lambda - \lambda_{0n})^2}{\left(\frac{\Delta\lambda_n}{2}\right)^2} \cdot e^{-\frac{9(\lambda - \lambda_{0n})^2}{\left(\frac{\Delta\lambda_n}{2}\right)^2}}, \quad (2.13)$$

де K_{max} – максимальне значення коефіцієнта поглинання оптичного випромінювання метаном; λ_{0n} – довжина хвилі центральної смуги поглинання; $\Delta\lambda_n$ – ширина смуги поглинання.

Інтегральні характеристики спектрів поглинання оптичного випромінювання основними складовими суми вуглеводнів наведено на рис. 2.15.

Оптична щільність суми вуглеводнів визначається у вигляді суми оптичної щільності усіх складових.

$$D_{CH}(\lambda) = D_{CH_4}(\lambda) + D_{C_2H_4}(\lambda) + D_{C_3H_8}(\lambda) + D_{C_4H_{10}}(\lambda) + \\ + D_{C_5H_{12}}(\lambda) + D_{C_6H_{14}}(\lambda). \quad (2.14)$$

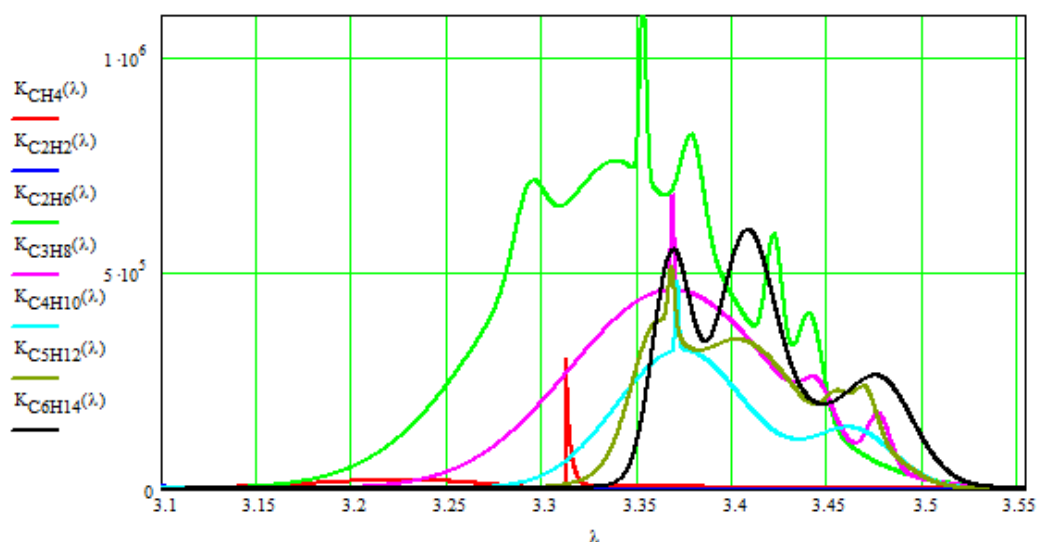


Рисунок 2.15 – Інтегральні характеристики спектрів поглинання оптичного випромінювання основними складовими суми вуглеводнів

Коефіцієнт передачі оптичного каналу визначається як:

$$T_{OK}(\lambda) = e^{-D_{CH}(\lambda)}. \quad (2.15)$$

Залежність зміни коефіцієнта передачі ОК від довжини хвилі оптичного випромінювання наведено на рис. 2.16.

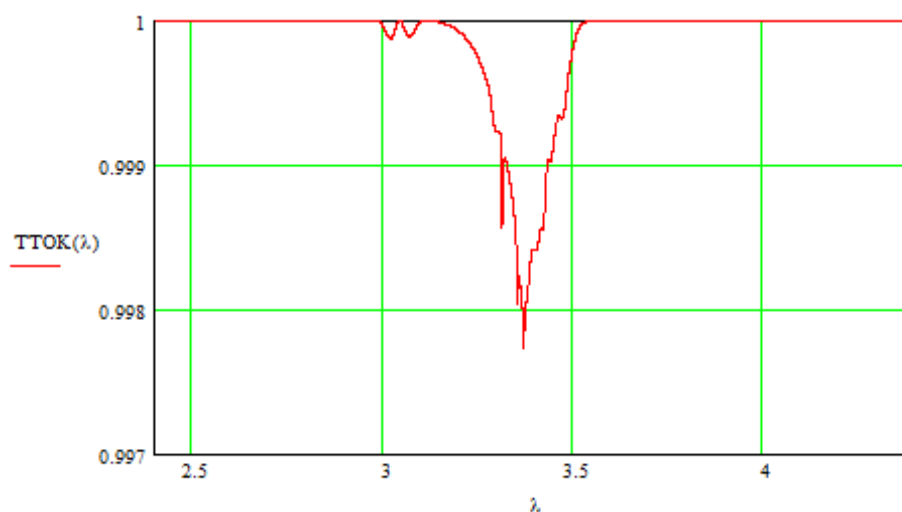


Рисунок 2.16 – Залежність зміни коефіцієнта передачі ОК від довжини хвилі оптичного випромінювання

Спектральна щільність потоку оптичного випромінювання вхідного сигналу ОК визначається наступним чином:

$$S_{\text{вхОК}}(\lambda) = S_{0\text{е}} \cdot s_{\text{е}}(\lambda), \quad (2.16)$$

де $S_{0\text{е}}$ – максимальне значення інтегрального коефіцієнта чутливості; $s_{\text{е}}(\lambda)$ – аналітичний опис огинаючої нормованого спектру поглинання.

Потік оптичного випромінювання, який минув шар речовини, що аналізується, утворює вихідний сигнал ОК, який містить інформацію щодо зміни концентрації аналізованого компоненти газової суміші інгредієнта:

$$S_{\text{вихОК}}(\lambda) = S_{\text{вхОК}}(\lambda) \cdot T_{\text{ОК}}(\lambda). \quad (2.17)$$

Спектр вхідного сигналу (пунктирна лінії) та спектр вихідного сигналу (суцільна лінія) з обліком втрат оптичного випромінювання в ОК наведено на рисунку 2.17. Різниця вхідного та вихідного сигналу є міра щодо зміни концентрації суми вуглеводнів[15].

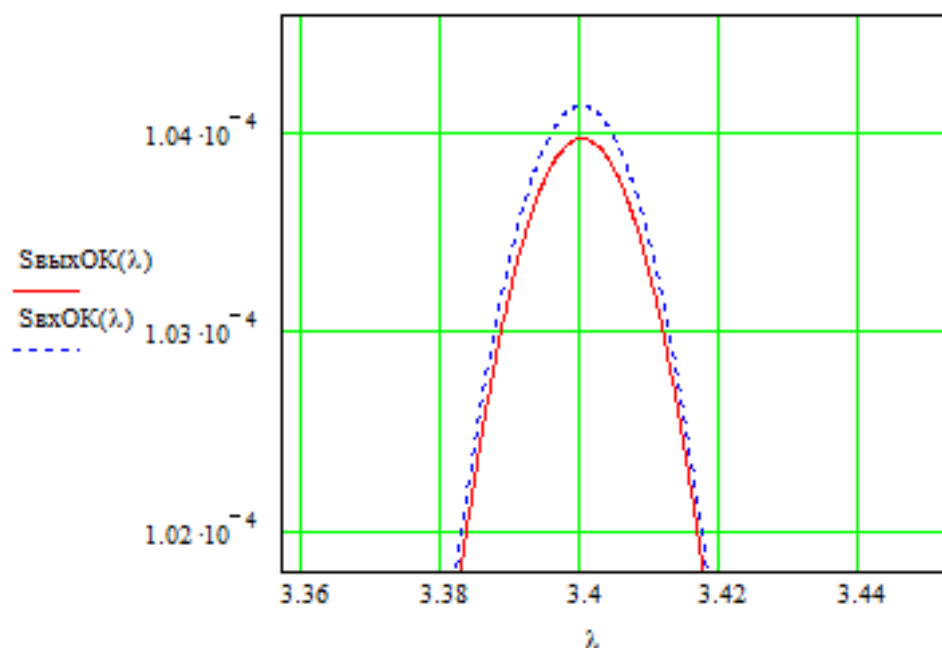


Рисунок 2.17 – Спектр вхідного та вихідного сигналу оптичного каналу

Для реалізації заходів щодо обмеження рівня оптичних шумів у системі застосований фільтр. Потік оптичного випромінювання, що пройшов через фільтр визначається за наступною формулою:

$$\Phi_{\text{вихОФ}} = \int_{2,75}^4 S_{\text{вихОФ}}(\lambda) d\lambda = 15,11 \text{ мкВт.} \quad (2.18)$$

Вхідний та вихідний об'єктиви однакові ($T_{\text{Овх}} = T_{\text{Ових}} = 0,92$). Величина оптичного потоку випромінювання, який вийшов з вихідного об'єктиву:

$$\Phi_{\text{Ових}} = \int_{2,75}^4 S_{\text{Ових}}(\lambda) d\lambda = 14,00 \text{ мкВт.} \quad (2.19)$$

Фотоприймач оптичного випромінювання повинен мати діапазон частот, який збігається з діапазоном оптичного випромінювання від СВД. Пік чутливості фотоприймача повинен покривати пікове значення довжини хвилі оптичного випромінювання від СВД. Як фотоприймач використовується фотодіод типу PD 36-06, який має наступні параметри:

- робочий діапазон довжин хвиль, λ , мкм від 1 до 3,8;
- діаметр фоточутливого елемента, d , мм 1;
- максимальна чутливість в діапазоні, λ_p , мкм від 2,5 до 3,5;
- темновий струм, I_T , мкА 0,6;
- номінальна напруга, U_p , В 10;
- інтегральна чутливість, S_{int} , А/Вт 1,2.

Зміна відносної спектральної чутливості ФД типу PD 36-06 наведено на рисунку 2.18. Ефективність введення потоку оптичного випромінювання до ФД визначається за коефіцієнтом введення:

$$K_{\text{ввФП}} = \frac{\int_0^{x_m} \int_0^{y_m} e^{-r^2(x^2+y^2)} dx dy}{I} = 0,968. \quad (2.20)$$

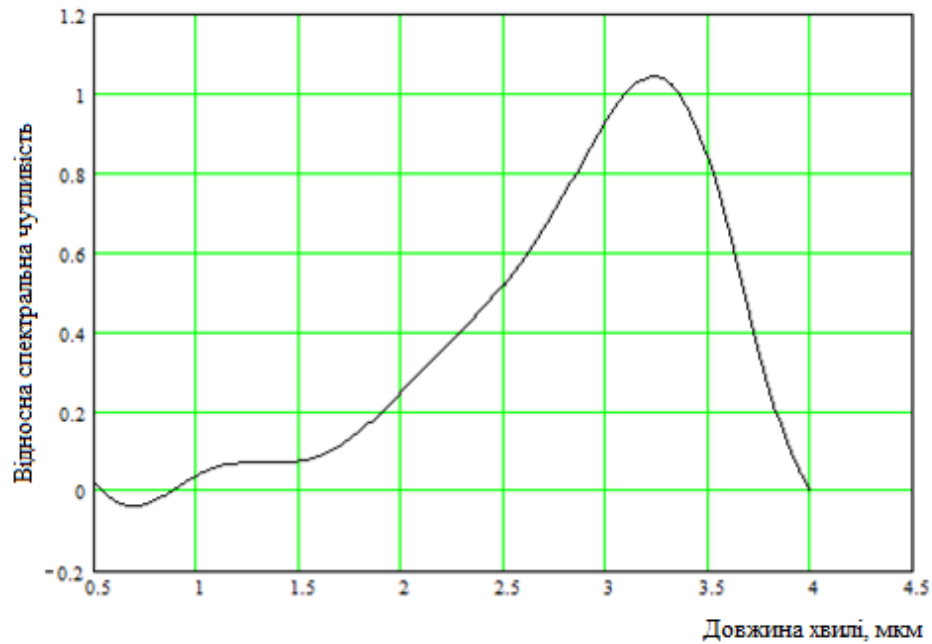


Рисунок 2.18 – Зміна відносної спектральної чутливості
ФД типу PD 36-06

Величина оптичного потоку, який потрапляє до фотодіода:

$$\Phi_{\text{вхФД}} = K_{\text{ввФД}} \cdot \Phi_{0\text{вих}} = 13,52 \text{ мкВт.} \quad (2.21)$$

Значення інтегральної чутливості ФД до сигналу розраховується за такою залежністю:

$$S_{C \text{ інт}} = S_{\text{інт}} \cdot \frac{\int_1^4 s_{\text{ФД}}(\lambda) \cdot s_{\text{с}}(\lambda) d\lambda}{\int_1^4 s_{\text{ФД}}(\lambda) d\lambda} = 0,15 \text{ А/Вт.} \quad (2.22)$$

Оптичний потік випромінювання завдяки фотодіоду перетворюється до електричного сигналу струму:

$$I_{\text{ФД}} = S_{C \text{ інт}} \cdot \Phi_{\text{вхФД}} \quad (2.23)$$

Значення вихідного струму фотодіода є дуже малим, тому він потребує підсилення. Схему попереднього підсилення вихідного струму фотодіода на базі операційного підсилювача постійного струму наведено на рисунку 2.19. Режим роботи фотодіода – фотогальванічний. У цьому режимі величина струму фотодіода не залежить від зміни температури [16,17].

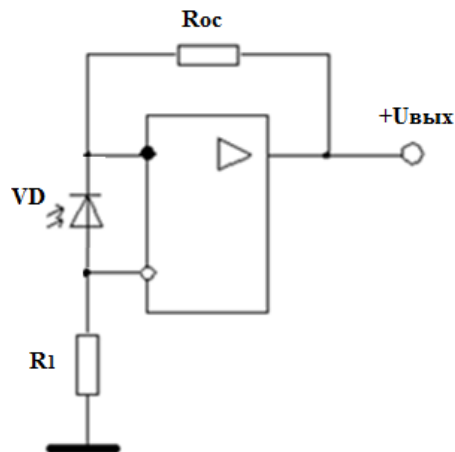


Рисунок 2.19 – Схема попереднього підсилювача вихідного струму фотодіода на базі операційного підсилювача

Попередній підсилювач здійснює перетворення струму фотодіода до сигналу напруги:

$$U_{\text{ФПвих}} = I_{\text{ФП}} \cdot R_{\text{ОС}}. \quad (2.24)$$

Під час розрахунку отриманий масив значень вихідної напруги фотопідсилювача, який відповідає масиву значень концентрації суми вуглеводнів. Цей масив апроксимований методом найменших квадратів (МНК), для отримання градуовальної характеристика фотопідсилювача, графік зміни якої представлений на рисунку 2.20 [18 – 20].

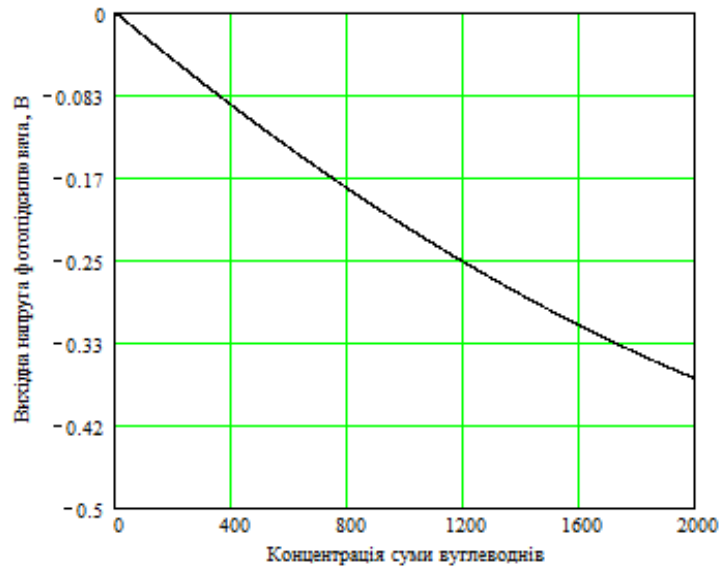


Рисунок 2.20 – Залежність зміни градувальної характеристики фотопідсилювача

2.3 Оцінка метрологічних характеристик вимірювального каналу оптико-електронної системи

Для оцінки метрологічних характеристик вимірювального каналу оптико-електронної системи визначення концентрації суми вуглеводнів виконано математичне моделювання. Кількість вимірювань під час аналізу концентрації суми вуглеводнів складало 20. Абсолютне значення похибки вимірювання визначається за формулою:

$$\varepsilon_i = U_{i \text{ ФПвих}} - U_{i \text{ вим}}, \quad (2.25)$$

де $U_{i \text{ ФПвих}}$ – значення вихідного сигналу напруги фотопідсилювача; $U_{i \text{ вим}}$ – сигнал напруги фотопідсилювача отриманий під час апроксимації.

Для виконання розрахунку основних метрологічних характеристик вимірювального каналу оптико-електронної системи задамося такими даними:

– максимальне значення концентрації суми вуглеводнів, ppm 2000;

- крок зміни концентрації суми вуглеводнів, ppm 100;
- довірча вірогідність, β 0,95;
- коефіцієнт Ст'юдента, t_β 2,09.

Середнє значення абсолютної похибки вимірювання визначається за наступною формулою:

$$m_\varepsilon = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_i. \quad (2.26)$$

Середньоквадратичне відхилення абсолютної похибки вимірювання:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - m_\varepsilon)^2. \quad (2.27)$$

Максимальне значення абсолютної похибки вимірювання:

$$\varepsilon_{\max} = |m_\varepsilon \pm \sigma_\varepsilon \cdot t_\beta|. \quad (2.28)$$

Під час оцінки метрологічних характеристик середнє значення абсолютної похибки – оцінка систематичної похибки, а середньоквадратичне відхилення є оцінкою випадкової похибки [21,22].

Під час розрахунків отримано такі значення оцінок метрологічних характеристик вимірювального каналу оптико-електронної системи:

- абсолютне значення похибки, $\varepsilon_{\max}$, В $2,91 \cdot 10^{-5}$;
- величина випадкової похибка, σ_ε , В $4,19 \cdot 10^{-4}$;
- значення систематичної похибки, m_ε , В $8,75 \cdot 10^{-4}$.

2.4 Висновки

Під час виконання досліджень впливу дестабілізуючих факторів можна зробити висновок, що для роботи розробленої інформаційно-вимірювальної системи необхідно:

- виконати стабілізацію температури;
- стабілізувати зміни тиску;
- усунути впливу нестабільності джерела оптичного випромінювання.

Здійснення стабілізація тиску й температури буде виконуватися завдяки введенню до складу розроблюваної інформаційно-вимірювальної системи пристрої пробопідготовки. У цьому пристрої суміш газів, що аналізується, приводиться до нормальних умов, а саме до температури в 20 °C та тиску 101,325 кПа (760 мм рт. ст.). Засоби регулювання тиску та температури, які використовуються в теперішній час, дозволяють стабілізувати ці параметри з точністю не менш ніж $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ та ± 1 кПа.

Для здійснення стабілізації джерела випромінювання до системи, що розробляється, вводиться порівняльний оптичний канал. Як інформаційний сигнал буде виступати відношення сигналу з каналу вимірювання до сигналу з каналу порівняння. Так, похибка від нестабільності джерела оптичного випромінювання буде мати місце в обох сигналах, а під час їх відношення вплив повністю усунеться. Отже можна стверджувати, що нестабільність джерела оптичного випромінювання також буде виключено.

3 МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕВОДНІВ

3.1 Математичне моделювання оптичної системи

Схему оптичну вимірювального каналу концентрації суми вуглеводнів у вихлопних газах двигунів внутрішнього згорання наведено на рисунку 3.1.

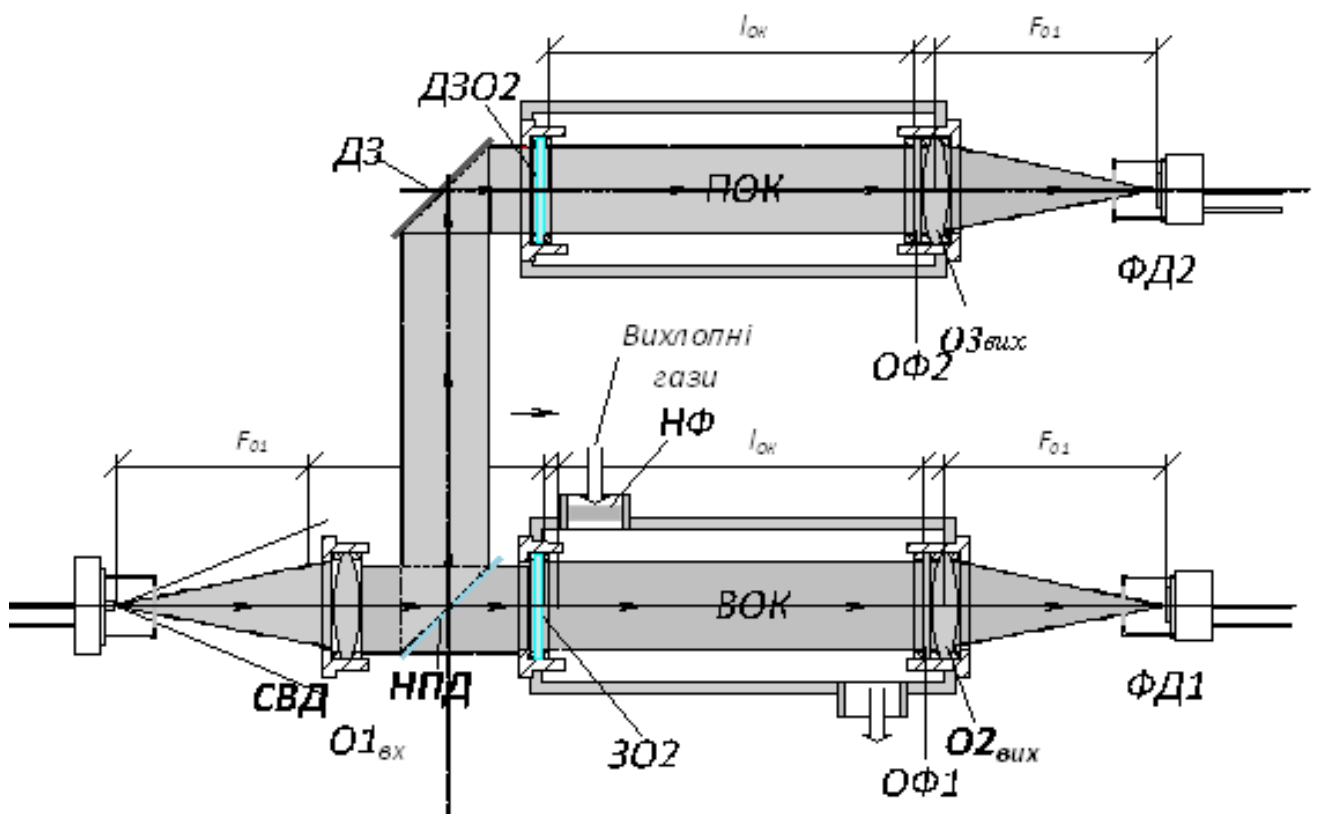


Рисунок 3.1 – Схема оптична вимірювального каналу концентрації суми вуглеводнів у вихлопних газах двигунів внутрішнього згорання

До складу оптична схеми вимірювального каналу концентрації суми вуглеводнів входять два оптичних канали: вимірювальний (ВОК) та порівняльний (ПОК). Оптичне випромінювання від СВД надходить до лінзи $O_{1\text{вх}}$, що збирає потік випромінювання. Потім оптичне випромінювання завдяки напівпрозорому дзеркалу (НПД), яке має коефіцієнтом пропускання 0,5

поділяється на два потоки. Один оптичний потік прямує до ВОК, а інший до ПОК.

До вимірювального оптичного каналу ВОК через нормуючий фільтр НФ подаються вихлопні гази двигуна внутрішнього згорання. Оптичне випромінювання від СВД проходить через вхідне дзеркало ДО1 до ВОК. У ВОК здійснюється поглинається оптичного випромінювання вихлопними газами. Частина випромінювання, яке не поглинулася, проходить через об'єктив $O_{2\text{вих}}$ до вікна фотоприймача ФД₁.

ПОК є собою замкнуту кювету, яку заздалегідь заповнено вимірюваний газ (СН) з концентрацією $-0,001^{\text{об}} \%$, значення якої відомо. Оптичне випромінювання, яке пройшло через ПОК, поступає до фотоприймача ФД₂. Вихідний сигнал оптико-електронної схеми – це відношення вихідного сигналу з ФД₁ до вихідного сигналу з ФД₂. Під час обробки цього різницевого сигналу отримують інформацію щодо зміни концентрації газу, що аналізується.

Для кількісного обліку нестабільності СВД використано коефіцієнт нестабільності випромінювання $K_{\text{нв}}$. Якщо величина цього коефіцієнта більше ніж 5%, то потужність оптичного випромінювання від СВД менше ніж 95 %. Величина потужності оптичного потоку випромінювання від СВД визначається за наступною формулою:

$$\Phi_{0\text{в}} = \Phi_{0\text{в1}} \cdot (1 - K_{\text{нв}}), \quad (3.1)$$

де $\Phi_{0\text{в1}}$ – номінальне значення потужності оптичного потоку випромінювання від СВД.

Ефективність введення оптичного випромінювання до об'єктива $O_{1\text{вх}}$ визначається коефіцієнтом $K_{\text{ев}}$, значення якого дорівнює 0,94. Коефіцієнт пропускання оптичного випромінювання $T_{O1\text{вх}}$ об'єктивом $O_{1\text{вх}}$ визначається параметрами об'єктива, значення цього коефіцієнта дорівнює 0,92. Оптичний потік випромінювання, який надійшов до ВОК визначається за (2.10).

$$\Phi_{\text{вих}O1} = 21,06 \text{ мкВт.}$$

Коефіцієнт пропускання НПД дорівнює $T_{\text{НПД}} = 0,5$, а коефіцієнт пропускання $O_{1\text{вх}}$ дорівнює коефіцієнту пропускання ДО1 (0,92). Величина оптичного потоку, що надходить в ВОК визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{вхВОК}} = \Phi_{\text{вих}O1} \cdot T_{\text{ДО1}} \cdot T_{\text{НПД}} = 9,75 \text{ мкВт.} \quad (3.2)$$

На цьому етапі моделювання необхідно ввести стабілізацію характеристик і параметрів оптико-електронного вимірювача за температурою та тиском. Замість нормальних умов, які прийнято під час моделювання формування аналітичного сигналу використано значення температури й тиску на основі їх змін. Стабілізація за температурою не перевищує $\pm 1^\circ\text{C}$, а стабілізація за тиском ± 1 кПа. Отже, температура вимірюваного середовища приймається $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, а тиску – $(101,3 \pm 1,0)$ кПа.

Вхідний та вихідний об'єктиви однакові, отже, $T_{O1\text{вх}} = T_{O2\text{вих}} = 0,92$. Визначимо величину оптичного потоку випромінювання, який вийшов з вихідного об'єктива:

$$\Phi_{O2\text{вих}} = \int_{2,75}^4 S_{\text{в}O2\text{вих}}(\lambda) d\lambda = 9,7 \text{ мкВт.} \quad (3.3)$$

Величина оптичного потоку, що входить до вікна фотодіода, дорівнює:

$$\Phi_{\text{вхФП1}} = K_{\text{ввФП1}} \cdot \Phi_{O2\text{вих}} = 5,93 \text{ мкВт.} \quad (3.4)$$

Оптичний потік випромінювання завдяки фотодіоду перетворюється до електричного сигналу – струм фотодіода. Цей сигнал залежить від спектральної чутливості до сигналу та оптичного потоку, який входить до вікна фотодіод.

Попередній підсилювач струму фотодіода перетворюється сигнал струму до сигналу напруги.

Під час розрахунку отриманий масив значень вихідної напруги фотопідсилювача, який відповідає масиву значень концентрації суми вуглеводнів. Цей масив апроксимований МНК, для отримання градуовальної характеристика фотопідсилювача.

Під час апроксимації градуовальної характеристики отримано такі показники точності:

– математичне очікування похибки апроксимації, m_{ε} мВ	$4,27 \cdot 10^{-5}$;
– дисперсія похибки апроксимації, D_{ε} мВ	$2,88 \cdot 10^{-8}$;
– середньоквадратичне відхилення похибки апроксимації, σ_{ε} мВ	$1,69 \cdot 10^{-4}$;
– максимальне значення похибки апроксимації (якщо $\beta=0,95$, $t_{\beta}=2.09$), m_{ε} мВ	$3,55 \cdot 10^{-4}$.

Розрахунок значень параметрів для ПОК виконується аналогічно як і розрахунок параметрів ВОК. Коефіцієнт пропускання лінзи ДО₂ дорівнює між собою $T_{ДО2} = T_{ДО1}$, а значення коефіцієнта відбиття дзеркала K_D дорівнює 0,98. Отже, потік оптичного випромінювання, що входить до ПОК:

$$\Phi_{\text{влПОК}} = \Phi_{\text{влвих}} \cdot T_{\text{ДО2}} \cdot T_{\text{НПД}} \cdot K_D = 9,5 \text{ мкВт.} \quad (3.5)$$

Величина оптичного потоку випромінювання, що вийшов з оптичного фільтра, визначається як:

$$\Phi_{\text{вихОФ2}} = \int_{2,75}^4 S_{\text{вихОФ2}}(\lambda) d\lambda = 6,5 \text{ мкВт.} \quad (3.6)$$

Вхідний та вихідний об'єктиви однакові, тому $T_{\text{О1вл}} = T_{\text{О3вих}} = 0,92$. Визначимо величину оптичного потоку, що вийшов з вихідного об'єктива:

$$\Phi_{O3вих} = \int_{2,75}^4 S_{\epsilon O3вих}(\lambda) d\lambda = 6,01 \text{ мкВт.} \quad (3.7)$$

Величина оптичного потоку випромінювання, що надходить до вікна фотоприймача ФД₂ (коефіцієнти введення до ФД1 і ФД2 дорівнюють між собою):

$$\Phi_{вхФП2} = K_{\epsilon\epsilonФП2} \cdot \Phi_{O3вих} = 5,82 \text{ мкВт.} \quad (3.8)$$

Під час зміни дестабілізуючих факторів: концентрація СН, тиск, температура та нестабільність потужності оптичного випромінювання від СВД, одержаний діапазон зміни вихідної напруги попередніх підсилювачів ВОК та ПОК.

3.2 Математичне моделювання електронної частини ІВС

До входу інформаційно-вимірювальної системи вводиться вихідна напруга попереднього підсилювача, яка є інформативним параметром. Значення цієї напруги підсилюється та нормується в межах зміни інформаційного сигналу в діапазоні від 0 до 2,5 В. Після цього, вихідна напруга передається до АЦП, де здійснюється перетворюється до десяткового коду.

Математичне моделювання інформаційно-вимірювальної системи складається з трьох етапів:

1) налаштування вимірювальних каналів системи на діапазон зміни інформаційного параметра;

2) градуювання вимірювальних каналів системи для отримання залежності між параметром, що вимірюється, та вихідною величиною оптико-електронного вимірювача концентрації газів з обліком впливу дестабілізуючих факторів;

3) оцінка показників точності вимірювальної системи, а також величини впливу неінформативних параметрів.

Під час налаштування вимірювальних каналів системи в лабораторних умовах як джерело сигналу використовуються зразки суміші. Ці зразки підтримують у часі з високим ступенем точності необхідне значення концентрації аналізованого газу. Сигнал налаштування – послідовність установки зі стабільною підтримкою трьох значень параметра контролю: середнього, а також граничних максимального та мінімального значень.

$C_{chM} = 0,002^{об.}\%$ – максимальне значення концентрації суми вуглеводнів;

$C_{chcr} = 0,001^{об.}\%$ – середнє значення концентрації суми вуглеводнів;

$C_{chm} = 0^{об.}\%$ – мінімальне значення концентрації суми вуглеводнів.

У лабораторних умовах перехід від одного рівня до на іншого здійснює за певний проміжок часу. Це для реалізації процесу налаштування інформаційно-вимірювальної системи не представляє інтересу. Тому, під час моделювання допускається, що переключення з одного рівня параметра контролю до іншого здійснюється миттєво. Тривалість сигналу налаштовуючого приймається таким, який дорівнює тривалості інформаційного сигналу. Тривалість сходинок приймається довільною. На рисунку 3.2 наведено вигляд сигналу для налаштування пристроїв вимірювального каналу системи. На базі сигналу налаштовуючого отримано сигнал для виконання градуювання вимірювального каналу системи, який наведено на рисунку 3.3.

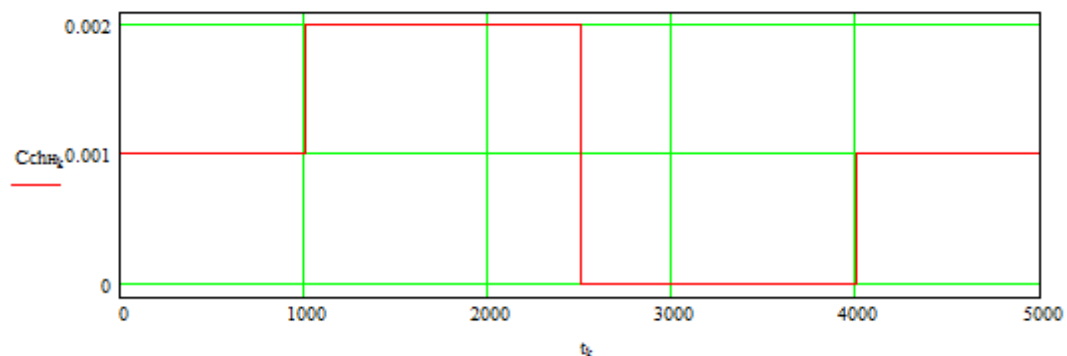


Рисунок 3.2 – Сигнал для налаштування пристроїв вимірювального каналу системи

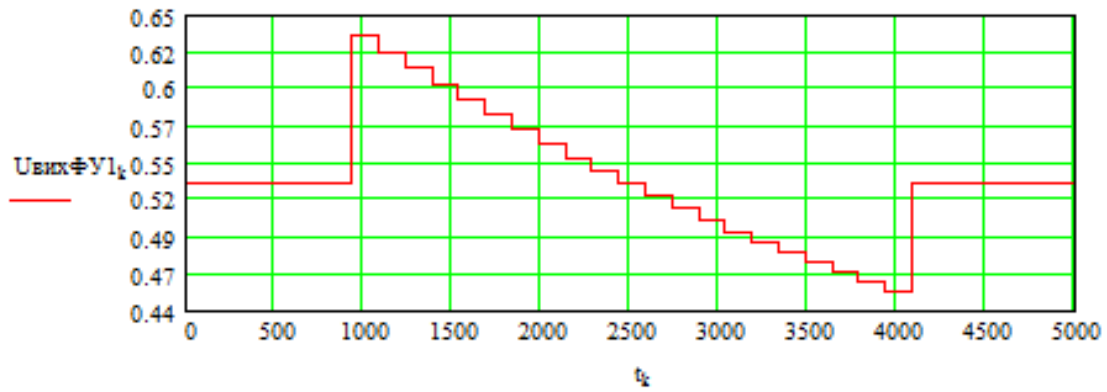


Рисунок 3.3 – Сигнал для виконання градування вимірювального каналу системи

З аналізу графічних залежностей видно, що максимальне значення вихідної напруги ПВП становить 0,64 В, середнє значення дорівнює 0,53 В, а мінімальне значення 0,45 В.

3.3 Моделювання алгоритмів обробки вимірювальних даних

Під час моделювання масштабування на вхід системи подається багаторівневий сигнал калібрування, в якому відсутні всіх види шумів. Кожний рівень сигналу калібрування це значення еталонної концентрації суми вуглеводнів. Тривалість сигналу калібрування приймається такою, що дорівнює тривалості інформаційного сигналу.

Здійснюється формування двох масивів: значень рівнів калібрування та еквівалентні їм значення вихідного коду АЦП. Ці масиви є експериментальна градувальна характеристика, яка представлена у вигляді наборів точок. Під час цифрової обробки даних вибір системи числення не має принципового значення. Тому виконується перетворення цілих двійкових чисел KOD2 (вихідні коди АЦП) до десяткових чисел KOD10. За допомогою методу найменших середніх квадратів характеристика $C_{em}(KOD10)$ апроксимується статичним поліномом $CMOD(KOD10)$. Це поліном є номінальною

характеристику перетворення вимірювального каналу системи. Під час досліджень встановлюється ступінь апроксимуючого полінома. Градувальна характеристика $CMOD(KOD10)$ може відрізняється від експериментальної $C_{em}(KOD10)$ в точках, які має градувальні рівні на величину, значення якої не більш ніж половина від максимальної похибки квантування концентрації суми вуглеводнів [24].

Під час порівняння значень градувальних рівнів, які відновлено алгоритмом з їх еталонами, визначаються показники точності характеристики перетворення. Для визначення оцінки точності перетворення виконується не менш 400 вимірювань, що дозволяє зменшити довірчі інтервали.

Під час досліджень отримано такі метрологічні характеристики вимірювального каналу системи:

– систематична складова похибки, $\text{об.}\%$	$0,12 \cdot 10^{-6}$;
– випадкова складова похибки, $\text{об.}\%$	$0,4 \cdot 10^{-6}$;
– максимальне значення похибка, $\text{об.}\%$	$0,9 \cdot 10^{-6}$;
– максимальне значення приведеної похибки, %	0,05.

3.4 Висновки

Застосування заходів щодо стабілізація температури й тиску призвело до суттєвого зменшення величини похибки результату вимірювання, що дозволило суттєво підвищені метрологічні характеристик вимірювального каналу інформаційно-вимірювальної системи.

Завдяки введенню до складу інформаційно-вимірювальної системи порівняльного оптичного каналу вдалося усунути вплив від нестабільності оптичної потужності джерела випромінювання.

4 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ІВС ВИКИДІВ АВТОМОБІЛІВ

4.1 Вимоги до структури ІВС контролю вихлопних газів автомобільного транспорту

Інформаційно-вимірювальна системи повинна здійснювати контроль вихлопів автомобільного транспорту та призначена для вимірювання у вихлопах концентрації суми вуглеводнів. Система має в своєму складі пристрій для підготовки проби, оптичний блок і оптико-електронну систему обробки результатів вимірювання.

Пристрій для підготовки проб формує необхідні параметри проби газу, що аналізується. Використання його пристрою дозволяє виконувати вимірювання концентрації суми вуглеводнів з максимальною точністю.

Схема оптична використовується для формування інформаційного сигналу. Вона складається з джерела випромінювання, в якості якого використовується СВД з центральною довжиною хвилі випромінювання 3,4 мкм. Також до складу оптичної системи входять об'єктиви, напівпрозорі лінзи, відкрита та закрита оптичні кювети, оптичних фільтрів і фотоприймачі.

Оптико-електронна системи застосовується для прийому інформаційного сигналу, який надходить з виходу оптичного каналу. Система здійснює перетворення цього сигналу до цифрового еквіваленту концентрації суми вуглеводнів. Потім інформацій передається до пристрою індикації та персонального комп'ютера [28].

4.2 Розробка методики функціонування пристрою підготовки проби

Проба від вихлопних газів автомобільного транспорту передається до пристрою підготовки проби, в якій газ спочатку проходить через канали

вимірювання температури й тиску. Вимірювальні данні щодо зміни цих параметрів застосовуються для автоматизованого керування пристроєм підготовки проби [29].

Пристрій підготовки проби має в своєму складі:

- стабілізацію температури газу, який відібрано для здійснення аналізу, а саме автоматичний нагрівач або охолоджувач до температури $t=(20\pm1)^{\circ}\text{C}$;
- стабілізацію тиску, що здійснюється завдяки використанні сенсорів-регуляторів тиску, відхиленням від норми в яких становить 1кПа.

Схему структурну пристрою безперервного забору проби під час аналізу вихлопних газів автомобільного транспорту представлено на рисунку 4.1.

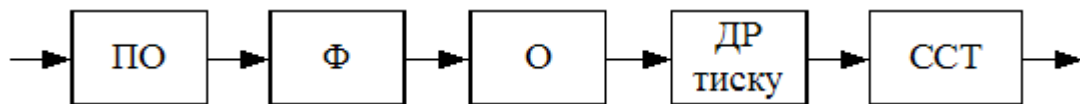


Рисунок 4.1 – Схема структурна пристрою для безперервного забору проби вихлопних газів автомобільного транспорту

Аналізована проба надходить до пробоотбірника (ПО), де здійснюється фільтрування від твердих часток за допомогою фільтра (Ф). Також здійснюється осушення від надлишкової вологи (О). У пристрої застосовується стабілізація тиску за допомогою сенсора-регулятором (ДР), стабілізація за температурою (ССТ). Після цього проба надходить вимірювального оптико-електронного каналу.

4.3 Розробка схеми структурної ІВС концентрації вуглеводнів автомобільного транспорту

Під час застосування оптико-абсорбційному методу вимірювання концентрація речовини визначається величина інтенсивності випромінювання, яка пройшла через пробу газу, що аналізується. Для реалізації в інформаційно-

вимірювальній системі цього методу створюється потік оптичного випромінювання. Це потік через кювету де знаходиться вимірюваний газом, а потім здійснюється перетворюється оптичного сигналу до електричного. Для підвищення точності вимірювання до оптичної схеми введено порівняльну оптичну кювету. У цій кюветі розміщено пробу газу, що досліджується з відомою концентрацією. При цьому вимірювальний сигнал є відношенням електричного сигналу від вимірювального каналу до сигналу від порівняльного оптичних каналів.

Як фотоприймачі в системі застосовуються фотодіоди та попередні підсилювачі їх вихідного сигналу. Від зміни концентрації аналізованого газу в пробі залежить щільність потоку оптичного випромінювання, яка визначається на виході оптичного каналу. Оптичний потік завдяки фотодіоду перетворюється до електричного сигналу в сигнал струм фотодіода. Попередній підсилювач здійснює перетворення струму фотодіода до сигналу напруги.

До складу інформаційно-вимірювальної системи, яка здійснює обробку результатів вимірювання, входить нормуючий перетворювач сигналу напруги, мультиплексор аналогових сигналів, пристрій вибірки-зберігання, аналого-цифровий перетворювач, мікропроцесорний пристрій та пристрій індикації результатів вимірювань.

Схему структурну інформаційно-вимірювальної системи вихлопів автомобільного транспорту наведено на рисунку 4.2, де використано наступні скорочення: ДС – джерело струму; ДВ – джерело випромінювання; ППП – пристрій підготовки проби; ОС – оптична схема; ФПП₁, ФПП₂ – фотоприймальні пристрої; ПП₁, ПП₂ – попередні підсилювачі; НП₁, НП₂ – нормуючі перетворювачі; СК₁, СК₂, СК₃ – сигнали керування; роботою пристроїв; АД₁, АД₂ – амплітудні детектори; МАС – мультиплексор аналогових сигналів; ПВЗ – пристрій вибірки-зберігання; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; МПП – мікропроцесорний пристрій; ПІ – пристрій індикації.

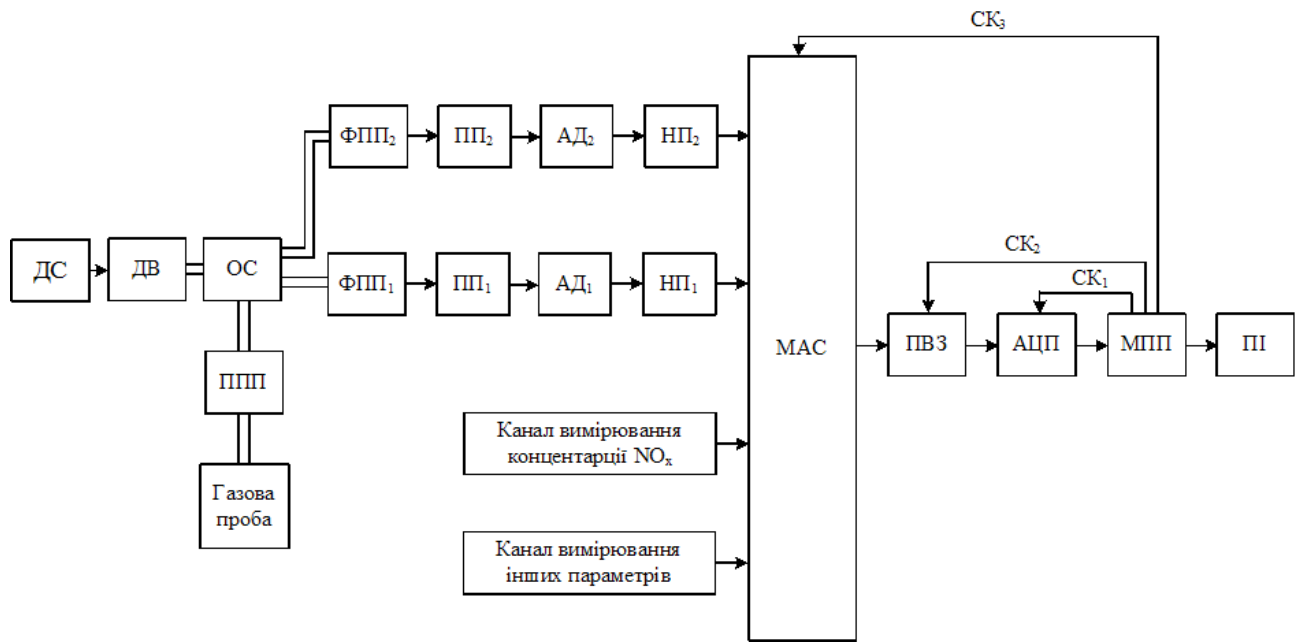


Рисунок 4.2 – Схема структурна ІВС викидів автомобілів

4.4 Оцінка метрологічних характеристик ІВС

Під час визначення метрологічних характеристик функціонування інформаційно-вимірювальної системи прийнятий найгірший випадок: як інформативний сигнал застосовується випадковий стаціонарний сигнал, який має нормальним розподілом миттєвих значень у діапазоні концентрацій суми вуглеводнів від 0 до 0,002^{об.%}), графік зміни якого наведено на рисунку 4.3. Відстань між сусідніми вимірюваннями вибрано такою, яка вдвічі більше ніж період кореляції процесу. Це зроблено для того, щоб результати вимірювання були статистично незалежними. Значення температури й тиску стабілізовано, а також виконано приведення їх нормальних умов. Також під час моделювання враховано вплив шумів усіх електронних компонентів системи. Для обліку шумів в ПВП, НП, та АЦП використано середні значення шумів цих вузлів. Отже, одержані метрологічні характеристики максимально наближені до реальних умов експлуатації. На основі статичної характеристики перетворення отримано зміни напруги фотопідсилювача ВОК (див. рис. 4.4) та ПОК (див. рис. 4.5) в залежності від зміни від концентрації суми вуглеводнів.

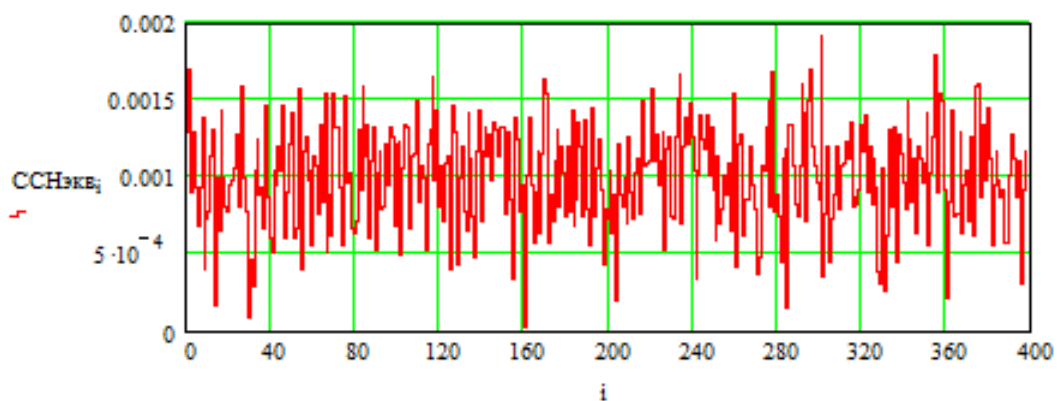


Рисунок 4.3 – Сигнал зміни концентрації суми вуглеводнів у вихлопах автомобільного транспорту

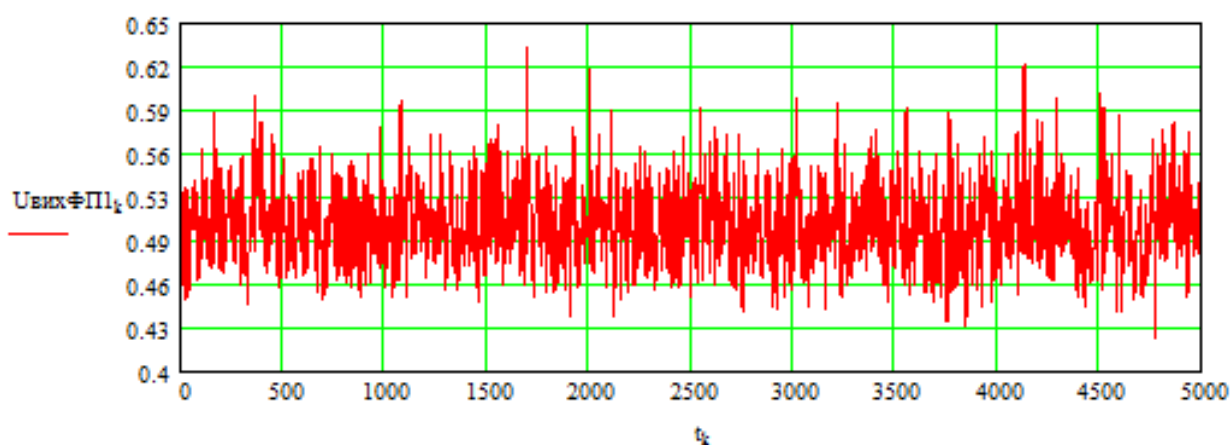


Рисунок 4.4 – Сигнал зміни вихідної напруги фотопідсилювача ВОК, який залежить від концентрації суми вуглеводнів

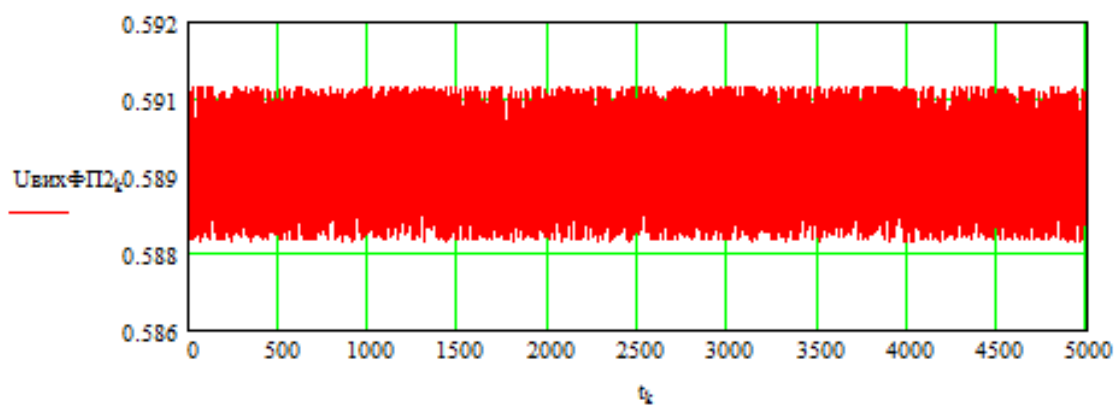


Рисунок 4.5 – Сигнал зміни вихідної напруги фотопідсилювача ПОК, який залежить від концентрації суми вуглеводнів

Після здійснення перетворення сигналу в АЦП, а також подальшої його обробки визначено кінцеві результати вимірювання, що відповідають початковим значенням концентрації суми вуглеводнів. Зіставлення результатів вимірювання з початковими значенням концентрації суми вуглеводнів наведено на рисунку 4.6.

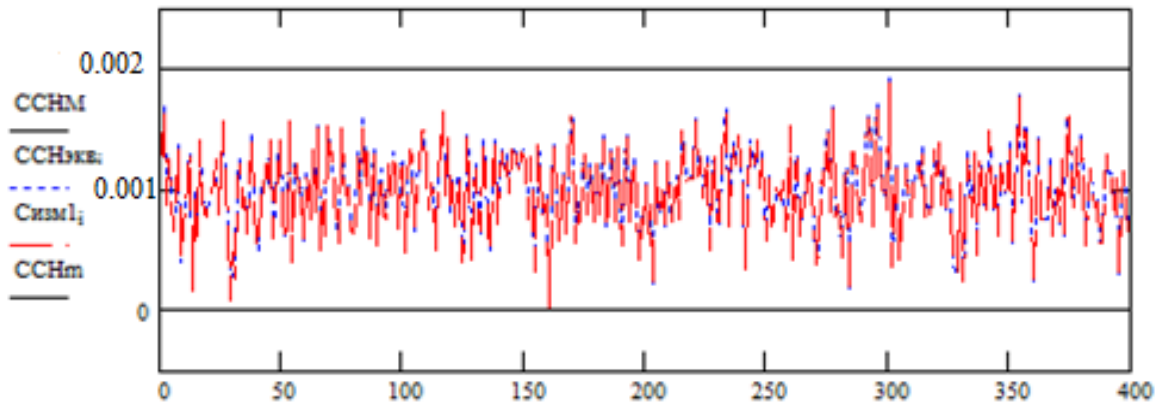


Рисунок 4.6 – Зіставлення результатів вимірювання з початковими значенням концентрації суми вуглеводнів

Оцінку метрологічних характеристик розробленої інформаційно-вимірювальної системи виконано поетапно з основи відхилення дестабілізуючих факторів в межах, що наведено раніше:

Під час відхилення температури на 1 °С:

- величина систематичної похибки, $\text{об.}\%$ $3,9 \cdot 10^{-6}$;
- значення випадкової похибки, $\text{об.}\%$ $1,0 \cdot 10^{-6}$;
- абсолютне значення максимальної похибки, $\text{об.}\%$ $49,6 \cdot 10^{-6}$;
- максимальне значення приведеної похибки, % 0,3.

Під час відхилення тиску на 1 кПа:

- величина систематичної похибки, $\text{об.}\%$ $17,5 \cdot 10^{-6}$;
- значення випадкової похибки, $\text{об.}\%$ $3,8 \cdot 10^{-6}$;
- абсолютне значення максимальної похибки, $\text{об.}\%$ $26,0 \cdot 10^{-6}$;
- максимальне значення приведеної похибки, % 1,3.

Під час нестабільності джерела оптичного випромінювання 5 %:

- величина систематичної похибки, $^{об.}\%$ $1,5 \cdot 10^{-6}$;
- значення випадкової похибки, $^{об.}\%$ $1,6 \cdot 10^{-6}$;
- абсолютне значення максимальної похибки, $^{об.}\%$ $5,0 \cdot 10^{-6}$;
- максимальне значення приведеної похибки, % 0,25.

Під час відхилення тиску, температури, а також нестабільності джерела випромінювання:

- величина систематичної похибки, $^{об.}\%$ $16 \cdot 10^{-6}$;
- значення випадкової похибки, $^{об.}\%$ $5,9 \cdot 10^{-6}$;
- абсолютне значення максимальної похибки, $^{об.}\%$ $29,2 \cdot 10^{-6}$;
- максимальне значення приведеної похибки, % 1,5.

Оцінка метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальної системи з урахуванням шумів її блоків та вузлів:

- величина систематичної похибки, $^{об.}\%$ $14,8 \cdot 10^{-6}$;
- значення випадкової похибки, $^{об.}\%$ $15,6 \cdot 10^{-6}$;
- абсолютне значення максимальної похибки, $^{об.}\%$ $49,6 \cdot 10^{-6}$;
- максимальне значення приведеної похибки, % 2,5.

Під час оцінки метрологічних характеристик одержано, що їх величина не перевищує максимального значення приведеної похибки 5%, яка має місце в прототипів системи. Отже розроблена система має кращі метрологічні характеристики.

4.5 Висновки

Обґрунтовано та розроблено вимоги до структурних рішень інформаційно-вимірювальної системи контролю вихлопних газів автомобільного транспорту. Розроблено принцип функціонування пристрою підготовки проб. Обґрунтовано та розроблено структуру системи. Виконано оцінку метрологічних характеристик розробленої системи.

ВИСНОВКИ

Як метод, який встановлений в основу інформаційно-вимірювальної системи, є оптико-абсорбційний метод. Його реалізація достатньо проста, вимірювачі на його основі мають високу швидкодію та чутливість.

Під час виконання досліджень впливу дестабілізуючих факторів можна зробити висновок, що для роботи розробленої інформаційно-вимірювальної системи необхідно:

- виконати стабілізацію температури;
- стабілізувати зміни тиску;
- усунути впливу нестабільності джерела оптичного випромінювання.

Здійснення стабілізація тиску й температури буде виконуватися завдяки введенню до складу розроблюваної інформаційно-вимірювальної системи пристрої пробопідготовки. У цьому пристрої суміш газів, що аналізується, приводиться до нормальних умов, а саме до температури в 20 °C та тиску 101,325 кПа (760 мм рт. ст.). Засоби регулювання тиску та температури, які використовуються в теперішній час, дозволяють стабілізувати ці параметри з точністю не менш ніж $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ та ± 1 кПа.

Для здійснення стабілізації джерела випромінювання до системи, що розробляється, вводиться порівняльний оптичний канал. Як інформаційний сигнал буде виступати відношення сигналу з каналу вимірювання до сигналу з каналу порівняння. Так, похибка від нестабільності джерела оптичного випромінювання буде мати місце в обох сигналах, а під час їх відношення вплив повністю усунеться. Отже можна стверджувати, що нестабільність джерела оптичного випромінювання також буде виключено.

Застосування заходів щодо стабілізація температури й тиску призвело до суттєвого зменшення величини похибки результату вимірювання, що дозволило суттєво підвищені метрологічні характеристик вимірювального каналу інформаційно-вимірювальної системи.

Завдяки введенню до складу інформаційно-вимірювальної системи порівняльного оптичного каналу вдалося усунути вплив від нестабільності оптичної потужності джерела випромінювання.

Обґрунтовано та розроблено вимоги до структурних рішень інформаційно-вимірювальної системи контролю вихлопних газів автомобільного транспорту. Розроблено принцип функціонування пристрою підготовки проб. Обґрунтовано та розроблено структуру системи. Виконано оцінку метрологічних характеристик розробленої системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Земля тревоги нашей. За матеріалами доповіді про стан навколишнього середовища в Донецькій області у 2012 році / під ред. С. В. Третьякова. – Донецьк, 2012. – 108 с.
2. Пилипенко, А.Т. Аналитическая химия. В двух книгах: кн. 1 / А.Т. Пилипенко, И.В. Пятницкий. – М.: Химия, 1990. – 480 с.
3. Пилипенко, А.Т. Аналитическая химия. В двух книгах: кн. 2 / А.Т. Пилипенко, И.В. Пятницкий. – М.: Химия, 1990. – 480 с.
4. Горелик, Д.О. Мониторинг загрязнения атмосферы и источников выбросов: Аероаналит. Измерения / Д.О. Горелик, Л.А. Конопелько. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 432 с.
5. Бегунов, А.А. Физико-химические измерения состава и свойств материалов и веществ: Учебное пособие / А.А. Бегунов, Л.А. Конопелько. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 144 с.
6. Козинцев, В.И. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: Учебное пособие / В. М. Орлов, Л. М. Белов – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.
7. Бреслер, П.И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение / П.И. Бреслер. – Л.:Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 164 с.
8. Немец, В.М. Спектральный анализ не органических газов / В.М. Немец, А.А. Петров. – М.: Химия, 1988. – 240 с.
9. Построение спектральных характеристик химических соединений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL:http://hitran.iao.ru](http://hitran.iao.ru).
10. Трунов, В.А. Моделирование формирования аналитического сигнала концентрации углеводородов в выхлопах автомобильного транспорта / В.А. Трунов, М.Г. Хламов // Праці XI Всеросійської наукової школи «Математичні дослідження в природничих науках». – м. Апатити, 2014 – С. 67 – 70.
11. Вовна, А.В. Применение оптико-абсорбционного метода для

измерения объемной концентрации метана в условиях угольных шахт / А.В. Вовна, М.Г. Хламов // Наукові праці Донецького національного технічного університету «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Випуск 13(121). – Донецьк, 2007. – С. 173 – 179.

12. Хламов, М.Г. Математические модели молекулярных спектров поглощения в измерительных газоаналитических системах / М.Г. Хламов, А.А. Лапігіна, И.С. Сагайдак // Наукові праці Донецького національного технічного університету «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Випуск 22(200). – Донецьк, 2012. – С. 195-200.

13. Салль, А.О. Инфракрасные газоаналитические измерения: Погрешности и информационная способность инфракрасных газоанализаторов / А.О. Салль. – М.: Издательство стандартов, 1971. – 100 с.

14. Трунов, В.А. Математическая модель измерительного канала концентрации суммы углеводородов в выхлопных газах автомобиля / В.А. Трунов, М.Г. Хламов // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку і безпека автотранспортного комплексу». – м. Новокузнецьк, 2014 – С. 125 – 128.

15. Трунов, В.А. Моделирование формирования аналитического сигнала концентрации углеводородов в выхлопах автомобильного транспорта / В.А. Трунов, М.Г. Хламов // Збірник наукових праць XIV міжнародної науково-технічної конференції аспірантів і студентів «Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих». – м. Донецьк, 2014 – С. 322 – 326.

16. Щербаков, В.И. Электронные схемы на операционных усилителях. Справочник / В. И. Щербаков, Г. И. Грездов. – К.: Техніка, 1983. – 213 с.

17. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том 2: Пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.

18. Иванов, В.И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы. Справочник / В.И. Иванов, А.И. Аксенов, А. М. Юшин – 1-е, перераб., доп. изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 448 с.

19. Аксененко, М.Д. Приемники оптического излучения. Справочник /

М.Д. Аксененк, М.Л. Бараночников. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.

20. Методические указания к расчетной работе «Моделирование оптического канала» по курсу «Современные направления электроники» (для студентов дневной формы обучения 0908 «Электроника» специальности 7.090803 «Электронные системы») / М.Г. Хламов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – 26 с.

21. Колеров. Д.К. Газоанализаторы. Проблемы практической метрологии / Д.К. Колеров. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 176 с.

22. Селиванов, М.Н. Качество измерений: Метрологическая справочная книга / А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.

23. Криксунов, Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.

24. Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Теория измерительных систем» (для студентов направления 0909 «Приборы») / М.Г. Хламов, А.А. Зори – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 29 с.

25. Володарский, Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 280 с.

26. Цапенко, М.П. Измерительные информационные системы: Учебное пособие / М. П. Цапенко – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 438 с.

27. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

28. Топильский, В.Б. Схемотехника измерительных устройств / В.Б. Топильский. – М.: БИНОМ, Лабораторная линия, 2006. – 232 с.

29. Пробоотбор в системах контроля показателей качества продукции: Учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 104 с.

30. Жидецкий, В.Ц. Практикум по охране труда / В.Ц. Жидецкий та др. – Л.: Афиша, 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 м^2 , об'єм – 20 м^3 . 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 ($S=21 \text{ м}^2$, $V=73,5 \text{ м}^3$) 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 вентилявання. 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:

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

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

Визначимо надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

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

де E_M – нормована освітленість для цієї зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк; g_1 – питоме 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:

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

де F – площа віконних прорізів (3х2,5=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 вимірювальної 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:

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