

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва, транспорту та енергетики  
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

**на тему**

**«Дослідження та розробка пристрою реєстрації  
випромінювання газоаналізатора»**

Виконав здобувач II курсу групи АК-24М  
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»  
спеціальності 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

\_\_\_\_\_ Едуард БАБІЙ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Юрій ПАРХОМЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Олег КИСЛУН

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Бабія Едуарда Ярославовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та розробка пристрою реєстрації випромінювання газоаналізатора

2. Керівник роботи Пархоменко Юрій Михайлович, канд. техн. наук, доцент,

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити пристрій реєстрації випромінювання газоаналізатора 1. Аналіз існуючих методів та засобів реєстрації газових компонентів; 2. Розробка функціональної та принципової схем пристрою, дослідження шляхів побудови пристрою реєстрації обсягів вмісту газових компонентів; 3. Розрахунок характеристик елементів автоматики; 4. Математичне моделювання процесу визначення концентрацій газоподібних елементів.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

| Розділ               | Консультант       | Підпис, дата   |                  |
|----------------------|-------------------|----------------|------------------|
|                      |                   | завдання видав | завдання прийняв |
| <i>Охорона праці</i> | <i>Жесан Р.В.</i> |                |                  |
|                      |                   |                |                  |
|                      |                   |                |                  |



## Анотація

на випускню кваліфікаційну роботу студента групи АК-24М Бабія Едуарда Ярославовича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Дослідження та розробка пристрою реєстрації випромінювання газоаналізатора».

В даній магістерській роботі досліджено метод внутрішньорезонансної лазерної спектроскопії та шляхи реєстрації оптичного спектру газоаналізатора.

Проаналізовано можливості використання пристроїв з зарядовим зв'язком для реєстрації газоподібних складових в ближньому інфрачервоному діапазоні, а також розроблено методику усереднення, вирівнювання та визначення базової спектральної інтенсивності. Розроблено блок реєстрації та попередньої обробки інформації на базі лінійного перетворювача та сучасної елементної бази. Вдосконалення існуючого оптичного газоаналізатора дозволяє підвищити якість та оперативність визначення вмісту газових складових.

**Ключові слова:** оптичний газоаналізатор, газові складові, світловий потік, мікропроцесорна система.

## Summary

on final qualification work of the student of the AK-24M group, Babiy Eduard Yaroslavovich, majoring in 174 “Automation, computer-integrated technologies and robotics” on the topic: “Research and development of a device for recording gas analyzer radiation”.

This master’s thesis investigates the method of intraresonant laser spectroscopy and ways of recording the optical spectrum of a gas analyzer.

The possibilities of using charge-coupled devices for recording gaseous components in the near infrared range are analyzed, and a method for averaging, leveling and determining the basic spectral intensity is developed. A unit for recording and pre-processing information based on a linear converter and a modern element base is developed. Improving the existing optical gas analyzer allows you to improve the quality and efficiency of determining the content of gas components.

**Keywords: optical gas analyzer, gas components, light flux, microprocessor system.**

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 2  |
| 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ .....   | 4  |
| 2. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ .....  | 9  |
| 2.1 Аналіз методів та датчиків реєстрації газових компонентів .....   | 9  |
| 2.2 Аналіз засобів реєстрації газових компонентів .....   | 12 |
| 2.3 Огляд існуючих газоаналізаторів .....   | 14 |
| 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ВНУТРІШНЬОРЕЗОНАНСНОЇ ЛАЗЕРНОЇ<br>СПЕКТРОСКОПІЇ .....  | 27 |
| 3.1 Обґрунтування обраного рішення .....  | 27 |
| 3.2 Теоретичні дослідження методу внутрішньорезонансної лазерної<br>спектроскопії.....  | 31 |
| 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПОБУДОВИ ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ<br>ОБСЯГІВ ВМІСТУ ГАЗОВИХ КОМПОНЕНТІВ ЗА МЕТОДОМ<br>ВНУТРІШНЬОРЕЗОНАНСНОЇ ЛАЗЕРНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ..... | 39 |
| 4.1 Опис структурної схеми пристрою з ВРЛС .....  | 39 |
| 4.2 Дослідження можливостей використання ПЗЗ .....  | 41 |
| 4.3 Розробка блоку реєстрації та попередньої обробки інформації.....  | 51 |
| 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПОБУДОВИ ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ<br>ОБСЯГІВ ВМІСТУ ГАЗОВИХ КОМПОНЕНТІВ ЗА МЕТОДОМ<br>ВНУТРІШНЬОРЕЗОНАНСНОЇ ЛАЗЕРНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ..... | 58 |
| ВИСНОВКИ.....   | 68 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....  | 69 |
| ДОДАТОК А.....  | 72 |

## ВСТУП

**Актуальність даної теми** зумовлена тим, що техногенна цивілізація здійснює руйнівний вплив на біосферу планети, загрожуючи не тільки здоров'ю людей, а й самому існуванню людства. Людська цивілізація вступила в етап, коли її доля вирішується не лише науково-технічним прогресом, а й усвідомленням екологічних парадигм.

В той же час, саме в рамках техногенної цивілізації були створені ефективні методи і засоби діагностики стану довкілля та прогнозування негативних наслідків дії багатьох чинників. Розвиток промисловості (хімічної, нафтогазопереробної, вугільної, металургійної) та складних технологій призводить до зростання викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, погіршуючи його екологічний стан.

Ефективний контроль за викидом шкідливих речовин неможливий без аналітичних вимірювань із застосуванням новітніх знань з фізики, хімії та вимірювальної техніки. Технічні засоби та аналітичні прилади, що використовуються для цього, повинні мати високі метрологічні характеристики.

Основну роль у забрудненні довкілля відіграє обмежена кількість речовин, зокрема газові викиди (сірчаний газ, оксиди азоту, вуглецю, фреон, аміак) та пил, сажа, аерозолі. Більшість сучасних аналітичних засобів призначена для вимірювання концентрацій саме цих речовин.

На міжнародному рівні проблема екологічного моніторингу вийшла на глобальний рівень у 1972 р. на Стокгольмській конференції ООН. Об'єктивною тенденцією сучасного етапу розвитку екології є перенесення акцентів на питання створення ефективних технічних засобів діагностики. Отже, завдання створення ефективних методів та технічних засобів для екологічного моніторингу завжди залишатимуться актуальними.

**Метою даної магістерської роботи** є дослідження шляхів реєстрації оптичного спектру газоаналізатора, призначеного для дослідницьких робіт.

**Об'єктом дослідження** є процес екологічного моніторингу хімічного складу газових сумішей, зокрема, лазерний оптичний газоаналізатор та його блок реєстрації й попередньої обробки інформації.

**Предметом дослідження** є система реєстрації та попередньої обробки інформації оптичного газоаналізатора, що потребує модернізації для досягнення високих метрологічних характеристик.

**Методи досліджень.** У ході робіт над проектом вивчалися різноманітні методи та засоби моніторингу хімічного складу газових сумішей. Використовувалися методи аналізу існуючих засобів контролю та вимог до метрологічних характеристик. Робота передбачає застосування оптичних методів аналізу, зокрема лазерної методики розпізнавання вмісту газу.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в модернізації блоку реєстрації та попередньої обробки інформації оптичного газоаналізатора. Модернізований пристрій повинен відповідати наступним вимогам, що мають практичне значення для дослідників-науковців:

Універсальність: можливість визначати концентрації різноманітних хімічних речовин у ближній інфрачервоній області спектру без зміни чутливих елементів.

Висока дозволяюча здатність.

Чутливість на рівні до одиниць об'ємних відсотків.

Низька похибка на рівні 5–7 %.

Модульна побудова та малі габарити.

Дискретна обробка даних та низьке енергоспоживання.

Надійність та довгий термін напрацювання до відмови.

Ці характеристики задовольнятимуть вимоги науковців, на відміну від існуючих засобів, призначених для загальних вимірів з похибкою 20-25%.

## 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ

З розвитком науки та техніки у людей з'явилась проблема контролю чистоти навколишнього середовища, адже продуктами виробництва є не тільки корисні результати а й супутні шкідливі викиди, що забруднюють навколишнє середовище та впливають на здоров'я людей. В основному від забруднення потерпає повітряний басейн планети адже переважна більшість шкідливих викидів є газоподібними.

Для контролю забрудненості повітряного басейну та виробничої зони люди сконструювали газоаналізатори, пристрої призначені для визначення концентрації окремих газових складових у дослідному зразку. Газоаналізатори через їх конструкційні особливості та різноманітність фізичних процесів покладених в основу їх роботи можуть визначати різні складові газів. При чому є вузькоспеціалізовані пристрої для контролю окремих газів наприклад таких як метан. Ці пристрої використовуються у шахтах на газо та нафтодобувних підприємствах. Головна мета їх використання завчасно попередити обслуговуючий персонал про витік вибухонебезпечного газу.

Оскільки крім метану у повітрі можуть бути присутні і інші вибухонебезпечні речовини такі як оксид та діоксид вуглецю, ацетилен та інші супутні гази вже розроблені газоаналізатори для контролю найбільш відомих вибухонебезпечних сполук всіх одночасно. Такі пристрої користуються досить великим попитом у підприємств газової нафтопереробної, нафтохімічної промисловості, служб водоканалу та кабельних мереж, пожежних служб а також підрозділів МНС.

Подібні пристрої використовують в обігрівальних установках та котлах. Але ціль яка досягається при цьому дещо інша. Оскільки найвища температура горіння при помірних витратах пального досягається за умови оптимального співвідношення пального та повітря, то пристрої потрібні для контролю процентного складу оксидів вуглецю та кисню, і відповідно прийняття рішення про ступінь оптимальності процесу горіння, та економії пального.

Оскільки майже усі транспортні засоби мають у своєму складі двигуни внутрішнього згоряння, а кількість автомобілів досягла великих масштабів, вони також вносять досить великий процент забруднення в навколишнє середовище. Для того щоб контролювати викиди, створені автомобільним потоком були розроблені газоаналізатори для контролю складу вихлопів двигунів внутрішнього згоряння. Проби на процентний склад оксиду вуглецю у вихлопах автомобілів проводяться щорічно, у такий спосіб досягається контроль зміни процентного складу вуглекислого газу у деяких масштабах, крім того ці прилади можна використовувати для діагностики та наладки двигунів на оптимальний режим роботи. Схожі за структурою та метою пристрої встановлюють у аеропортах для контролю викидів літаків. Крім того в літаках використовують газоаналізатори для контролю вмісту пального у робочій суміші реактивних двигунів, що в свою чергу дає можливість відслідковувати ступінь витрати пального при польоті. На річних та морських транспортних суднах газоаналізатори також використовуються для контролю вихлопних газів двигунів, а на танкерах ще й для контролю ступеню та кількості витоку транспортованої речовини. Крім того по аналізу проби нафти з поверхні води можна навіть визначити з якого саме судна відбувся витік.

Також великою проблемою є викиди великих промислових підприємств, але тут справа не обмежується лише чадним та вуглекислим газом, в залежності від виробництва у викиди потрапляє ще й частка хімічних речовин, що використовуються на даному виробництві. Дуже часто ці речовини, такі наприклад як випари ртуті, хлор, оксиди азоту є отруйними і дуже важливо визначити та знешкодити їх ще до викиду в атмосферу. Для цього на підприємствах також встановлюють газоаналізатори суміщені в даному випадку з нейтралізаторами отруйних речовин.

На підприємствах хімічної промисловості також використовуються такі прилади. Справа в тому що за умов сучасної технології потрібно досягати великої точності та чистоти реактивів та кінцевих продуктів, з великою точністю визначати концентрації речовин. У цьому також допомагають газоаналізатори.

Принцип дії їх дещо відрізняється від загальнопоширених, але мета залишається однією – контроль складу та вмісту дослідного зразка. Наприклад газоаналізатори використовуються для контролю вмісту робочого середовища при виготовленні ртутних та неонових ламп. Навіть при виробництві ламп внутрішнього розжарювання використовуються газоаналізатори для контролю процентного вмісту інертного газу в колбі лампи, та процентний вміст кисню у цьому середовищі.

З розвитком промисловості постала проблема дешевого та зручного у транспортуванні пального, таким паливом став природний газ. Для передачі його у великих кількостях на великі відстані збудовані газопроводи досить великої протяжності. Для контролю витоку газу з газопроводу на розподільчих станціях встановлюють пристрої чутливі до метану та інших похідних і складових природного газу. А також у самому газопроводі встановлюються газоаналізуючі датчики для контролю складу потоку газу, що проходить через розподільник. За допомогою мобільних газоаналізаторів можна визначати місце витоку газу, тобто розгерметизацію трубопроводу, навіть тоді коли трубопровід лежить під землею. На заправних станціях встановлюють газоаналізатори для визначення складу газу, але в даному випадку вони суміщені з манометрами, що дозволяє визначити ще й тиск у кінцевому резервуарі. Оскільки усі великі підприємства мають свої електрогенератори з приводом від турбін, там також використовують пристрої для контролю газової суміші. Вони знайшли своє застосування у газоперекачуючих агрегатах компресорних установок з приводом від газотурбінних агрегатів та газомоторних компресорах, газомоторних, газотурбінних та дизельних генераторів. У сховищах паливних та паливомастильних матеріалів також встановлюють газоаналізатори щоб запобігти виникненню вибухонебезпечної ситуації, пов'язаної з спонтанним випаровуванням та витоком горючих речовин.

Окрім контролю у повітрі вибухонебезпечних, шкідливих та отруйних речовин газоаналізатори можуть використовуватись і для контролю процентного вмісту кисню у повітрі. Цей параметр є критичним для робіт, що проводяться на

великих глибинах та у замкнутих приміщеннях і служать для сигналізації про зміну стану довколишнього середовища. Ці прилади використовують у колодязях та колекторах підземних інженерних мереж, тунелях, трюмах транспортних суден, цистернах та інших замкнутих об'ємах. На великих підприємствах промисловості газоаналізатори для контролю вмісту кисню можуть встановлюватись у системах розподілення повітря та продувних контурах а також в інших технологічних установках.

Своє застосування газоаналізатори знайшли навіть у побуті. Зараз розроблено кілька моделей сигналізаторів присутності в атмосфері метану та пропан бутанової суміші, призначених для встановлення у приміщеннях житлових будинків, що оснащені кухнями з газовими пальниками, газовими колонками. Мають можливість видачі сигналізуючої інформації та видачі керуючих імпульсів на виконавчі механізми для перекриття подачі газу.

Крім того газоаналізатори використовуються для контролю екологічної обстановки на підприємствах у містах та у повітряному басейні в цілому. Тобто у служб екологічної розвідки, хімічного забруднення та інших контролюючих організаціях.

Газоаналізатори спеціальних конструкцій можуть бути встановлені на мобільні об'єкти та використовуватись для контролю чистоти повітря, рослин, ґрунтів. В цьому випадку використовують спосіб лазерної спектрографії, заснований на поглинання окремими газовими складовими визначених довжин світлових хвиль у спектрі випромінювання.

Оскільки забруднення впливає на усіх людей то усе частіше почали з'являтися індивідуальні газоаналізатори, що допомагають працівникам при втомленні та неуважності запобігти виникненню аварій та пожеж. Такі пристрої називаються сигналізаторами до вибухонебезпечних концентрацій газів.

У воєнний час та при надзвичайних ситуаціях газоаналізатори також використовуються для хімічної та екологічної розвідки на місцевості, що допомагає зберегти життя багатьом людям при використанні зброї масового ураження.

Також використовуються у науково-дослідних організаціях. Наприклад деякі моделі газоаналізаторів використовуються навіть у криміналістиці для визначення та знешкодження вибухонебезпечних речовин а також для визначення складу вибухової суміші при веденні розслідування. Але в основному прилади такого класу використовують для досліджень атмосфери. Так наприклад для визначення росту процентного вмісту вуглекислого газу у повітряному басейні планети. На метеорологічних станціях по складу атмосфери та її густоти можна передбачити погоду.

У лабораторіях газоаналізатори використовують для визначення чистоти хімічних сумішей, аналізу нових речовин та взаємодії їх між собою. Крім того з польотом людини в космос виникла потреба у дослідженні позаземних тіл та речовин без ризику для життя людей на великих відстанях, з цим також повністю справляються газоаналізатори, які дають змогу судити по випарам твердих речовин та їх похідних оцінити склад пробного зразка.

Не зважаючи на широкий спектр використання немає універсального газоаналізатора, який би можна було використовувати з однаковим успіхом для дослідження більшості складових газових компонентів одночасно. Спроба розробки саме такого пристрою і буде описана у даній магістерській роботі.

## 2.ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ

### 2.1 Аналіз методів та датчиків реєстрації газових компонентів

При проведенні екологічного моніторингу довкілля застосовують фізичні, фізико-хімічні і хімічні методи аналізу.

Фізичні методи аналізу базуються на вимірюванні фізичних величин, які притаманні речовині, що аналізується, наприклад, вимірювання густини, в'язкості, теплопровідності, магнітної сприйнятливості, показника заломлення, коефіцієнта поглинання тощо.

Фізико-хімічні базуються на хімічних перетвореннях речовини і вимірюванні фізичних величин, що супроводжують ці перетворення, наприклад, температури або інтенсивності випромінювання і т.п.

Хімічні базуються на хімічних перетвореннях і вимірюванні складу речовин (кількісний аналіз), або отриманні інформації про те, з яких речовин складається об'єкт, що досліджується (якісний аналіз).

Селективні методи аналізу базуються на використанні фізичного явища або хімічної реакції, яка однозначно залежить від концентрації в суміші компонента, що визначається (групи компонентів одного класу).

Інтегральні методи аналізу базуються на визначенні відмінності в фізико-хімічних властивостях компонентів суміші.

В таблиці 2.1 наведена загальна класифікація методів визначення газових компонентів.

**Датчики газу.** Для простих застосувань виявлення різноманітних газів та їх моніторингу, коли можна обійтися невисокою точністю й селективністю застосовують газові датчики, що виробляють більш-менш специфічні для різноманітних речовин електричні сигнали.

При цьому використанні різноманітні фізичні ефекти і хімічні властивості досліджуваних речовин, реалізовані в:

Таблиця 2.1. Класифікація визначення газових компонентів

| Метод аналізу   | Принцип дії           | Придатність для аналізу |            |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|------------|
|                 |                       | газів                   | рідин      |
|                 |                       | Фізичний                | Механічний |
|                 | Дифузійний            | +                       | -          |
|                 | Акустичний            | +                       | +          |
|                 | Тепловий              | +                       | +          |
|                 | Магнітний             | +                       | -          |
|                 | Оптичний              | +                       | +          |
|                 | Радіоактивний         | +                       | +          |
|                 | Радіоспектрометричний | +                       | +          |
|                 | Іонізаційний          | +                       | +          |
|                 | Діелькометричний      | -                       | +          |
|                 | Хроматографічний      | +                       | +          |
|                 | Масс-спектрометричний | +                       | +          |
| Фізико-хімічний | Електрохімічний       | +                       | +          |
|                 | Термохімічний         | +                       | +          |
|                 | Емісійний             | +                       | +          |
|                 | Хемілюмінесцентний    | +                       | -          |
| Хімічний        | Титрометричний        | -                       | +          |
|                 | Об'ємний              | +                       | +          |
|                 | Манометричний         | +                       | -          |
|                 | Комбінований          | +                       | +          |

-термокондуктометричних датчиках, які використовуються для визначення CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> та деяких інших газів.

- термохімічних (каталітичних) датчиках – для визначення CO, вибухонебезпечних та горючих газів.

- напівпровідникових датчиках – спирти, вуглеводи, токсичні гази.

- паливних комірках (кисень).

Прилади, засновані на використанні газових датчиків, відрізняються відносною простотою конструкції, порівняною дешевизною й простотою в

обслуговуванні, що дозволяє використовувати їх персоналу, що не має спеціальних навичок.

До вад таких приладів відноситься їхня низька чутливість та селективність, що обмежують їх коло використання особливо при точних замірах. Ці прилади використовуються там, де необхідно визначати концентрацію домішок на рівні одиниць об'ємних відсотків і вище. Стосовно селективності, то потрібна попередня інформація про те, який газ є присутнім у повітрі.

Іншим шляхом розвитку є випуск дешевих але точних датчиків, що об'єднують переваги газових хроматографів (висока чутливість та селективність) та газових датчиків (простота використання й оперативність вимірів).

Такі датчики були створені завдяки сучасній технології, але вони дещо втратили в точності, но суттєво знизили ціну газоаналізаторів.

Найбільший інтерес представляють напівпровідникові газові датчики. Зараз налагоджено їх масовий випуск. Принцип дії таких датчиків заснований на явищі зміни електричного опору тонкоплівкового напівпровідника [4] при абсорбції на його поверхні молекул різноманітних газів, що стають донорами або акцепторами електронів у зону провідності напівпровідника. Чим більша концентрація молекул в оточуючому просторі, тим більша кількість абсорбованих на поверхні датчика молекул, а отже, і результуюча зміна електропровідності. Параметри датчика сильно залежать від температури оточуючого середовища, і саме це потребує складної системи термостабілізації. Якщо задатися ціллю підвищити селективність та точність датчика потрібно зважати на температурні залежності, що мають нелінійну форму, до того ж вони різні для різних газів. Це суттєво ускладнює методику обробки результатів та дещо знижує точність вимірів.

Справа в тому, що для кожного газу є своя залежність впливу його на провідність тонкоплівкового датчика, до того ж сильно залежна від температури. Тому визначення складу газу таким датчиком потребує термостабілізації, проведення кількох вимірів і аналіз отриманих даних на основі статистичних залежностей за допомогою складного математичного апарату. Такий спосіб

вимагає висококваліфікованих працівників та не зважаючи на це, не дає досить високої точності, через похибки при вимірюванні температури та провідності.

## **2.2 Аналіз засобів реєстрації газових компонентів**

Прилади, призначені для кількісного визначення складу газу, називаються газоаналізаторами. Залежно від призначення вони підрозділяються на *переносні* і *автоматичні* (стаціонарні). На рис. 2.1 наведена класифікація газоаналізаторів залежно від методу визначення концентрації газової суміші.

Переносні газоаналізатори застосовуються в лабораторних умовах при виконанні дослідницьких робіт, при проведенні енергетичного аудиту

технологічних систем, при випробуваннях і налагодженні різних промислових теплотехнічних установок (плавильних, нагрівальних і термічних печей, парових і водогрійних котлів, сушильних установок і ін.).

Автоматичні (стаціонарні) газоаналізатори призначені для безперервного автоматичного вимірювання змісту одного або декількох компонентів у газовій суміші. На основі безперервного контролю газового середовища в робочому просторі промислового агрегату може здійснюватися автоматизоване керування технологічним процесом.

Газоаналізатори залежно від способу визначення концентрації окремих компонентів газової суміші діляться на:

- *хімічні* (хімічні властивості газових молекул);
- *теплові* (фізичні властивості газу);
- *магнітні* (магнітні властивості газу);
- *ємнісні* (діелектрична проникність середовища);
- *випарні* (ефект випару, кипіння і конденсації рідини);
- *оптичні* (здатність поглинати електромагнітні хвилі)
- *хроматографічні* (адсорбційні властивості газових молекул);
- *спектрометричні* (спектральні властивості газу);

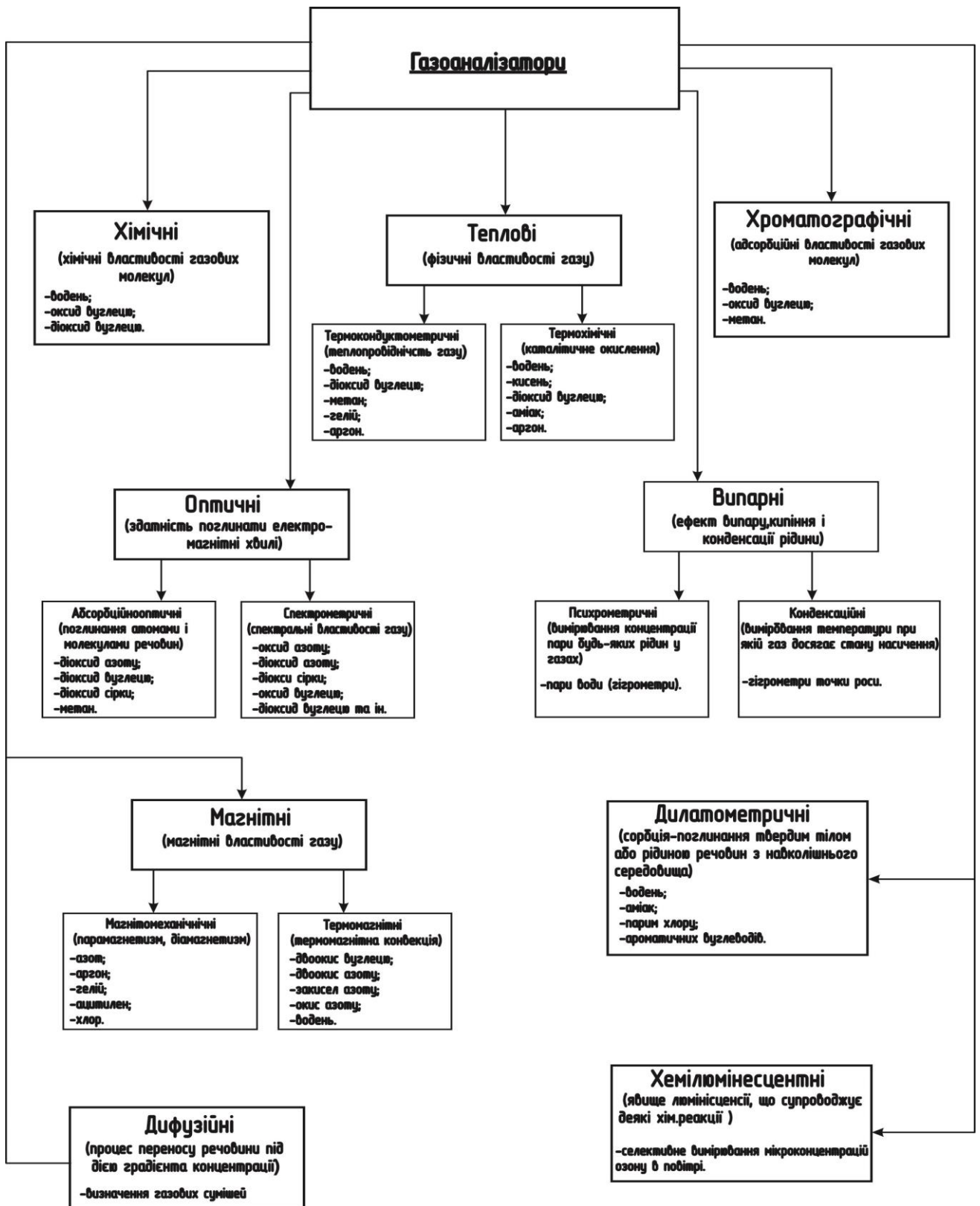


Рисунок 2.1 - Класифікація газоаналізаторів залежно від способу визначення газової суміші.

В хімічних газоаналізаторах визначення концентрації окремих компонентів газової суміші виконується методом поглинання цих компонентів хімічними реактивами. По зменшенню початкового мірного об'єму газу визначають склад даного компоненту в газовій суміші.

Для багатьох компонентів газу розроблені селективні хімічні реактиви, які поглинають (реагують) тільки аналізований компонент. Непоглинений залишок аналізованого газу надходить у газовимірювальний пристрій, де визначається зменшення об'єму, що відповідає поглиненому компоненту. Цей метод застосовується як у переносних газоаналізаторах ручної дії, названих часто приладами Орса, так і в автоматичних.

Найбільше розповсюдження отримали переносні газоаналізатори для визначення якості спалювання палива під час пуско-налагоджувальних робіт теплових агрегатів, які використовують тверде, рідке або газоподібне паливо. При цьому аналізуються три компоненти: CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> і CO. Такі газоаналізатори застосовуються також для контролю і градування автоматичних газоаналізаторів на ці ж компоненти.

Недоліками методу є: неможливість вимірювання різних концентрацій, тому що ціна розподілу вимірювальної бюретки становить 0,1 мл; періодичність дії становить 20-30 аналізів за годину; необхідність частої заміни реактивів; неможливість використання в системах автоматичного регулювання.

У теплових газоаналізаторах для визначення концентрації якого-небудь компоненту в газовій суміші використовуються його теплові властивості, такі як теплопровідність (*термокондуктометричні*), тепловий ефект реакції каталітичного окислювання (*термохімічні*) і ін.

### 2.3 Огляд існуючих газоаналізаторів

**Термокондуктометричні газоаналізатори** (теплові) є одними з найбільш поширених. Їхня дія ґрунтується на значній різниці коефіцієнтів теплопровідності одного компонента суміші порівняно з іншими. Так,

наприклад, теплопровідність таких газів як  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{He}$ , мають теплопровідність, що суттєво відрізняється від теплопровідності повітря. Присутність одного з цих газів у повітрі призводить до зміни загальної теплопровідності, що прямо вказує на його концентрацію.

Аналіз багатоконпонентної суміші за цим принципом можливий, якщо всі компоненти, окрім вимірюваного, мають схожу теплопровідність. Якщо ж присутні компоненти, що впливають на теплопровідність, але не є цільовими для вимірювання, їх необхідно вилучити перед аналізом. Так, наприклад, при вимірюванні концентрації  $\text{CO}_2$  у димових газах необхідно видалити такі компоненти як  $\text{H}_2$  і  $\text{O}_2$ , які знаходяться в невеликій кількості, але впливають на загальну теплопровідність.

У теплових газоаналізаторах для визначення концентрації окремих компонентів використовуються мостові схеми, у яких плечима мосту є платинові спіралі, нагріті до температури і поміщені в газові камери.

Термохімічний аналізатор використовує тепловий ефект хімічної реакції, що відбувається між цільовим компонентом та допоміжним реагентом. Вимірювальною величиною є температура, значення якої прямо залежить від теплового ефекту реакції. Цей принцип застосовується для аналізу як газів, так і рідин.

Для газоаналізаторів використовуються реакції окислення на каталітичних поверхнях, у полум'ї або в газових потоках. Для аналізаторів рідин застосовують реакції розведення, нейтралізації, змішування або реакції зі специфічними реагентами.

В основу роботи **магнітних газоаналізаторів** покладені різні явища, пов'язані із взаємодією обумовленого компоненту аналізованої (у загальному випадку багатоконпонентної) газової суміші з магнітним полем.

Гази, які втягуються в магнітне поле, називають *парамагнітними*, а ті гази, які виштовхуються з магнітного поля, — *діамагнітними*. Кількісно магнітні властивості газів визначаються величиною, названою магнітною сприйнятливістю. Магнітна сприйнятливість парамагнітних газів є позитивною

величиною, діамагнітних газів - негативною. Вона має властивість адитивності. Переважна більшість газів і пари є діамагнітними.

Магнітні газоаналізатори використовуються для визначення тільки концентрації кисню в газовій суміші, тому що кисень на відміну від інших газів має сильні магнітні властивості, який є парамагнітною речовиною. Якщо відносну магнітну сприйнятливості кисню прийняти за одиницю, то ця величина для всіх інших газів на два порядки менше, ніж у кисні.

Тобто всі гази, крім кисню, є практично немагнітними речовинами. Існує кілька методів вимірювання магнітної сприйнятливості газової суміші, що містить кисень. Найбільше розповсюдження отримав метод, що називається *термомагнітна конвекція*. У магнітному газоаналізаторі аналізований газ під дією магнітного поля втягується в спеціальну вимірювальну камеру, у якій знаходиться чутливий елемент, що нагрівається електричним струмом. Газ, зіштовхуючись із чутливим елементом, нагрівається і кисень втрачає свої магнітні властивості. Внаслідок цього, нагрітий газ виштовхується з камери, розташованої в магнітному полі, холодним газом і таким чином, виникає безперервний потік газу через вимірювальну камеру.

За принципом дії **випарні і конденсаційні газоаналізатори** відносяться до теплових засобів вимірювання, тому що в їхній роботі використовуються теплові ефекти випару, кипіння і конденсації рідини.

Одним з найдавніших і розповсюджених газоаналізаторів є *психрометричний*, або *психрометр*. Дія його заснована на вимірюванні змін температури рідини при її випаренні в аналізований газ, який містить компонент пари цієї рідини. Психрометри можуть використовуватись для вимірювання концентрації пари будь-яких рідин у газах, однак найбільше широко вони застосовуються для вимірювання концентрації пари води, тобто як гігрометри.

Концентрацію пари рідини в газах прийнято характеризувати *абсолютною* або *відотною* вологістю.

Абсолютна вологість визначається як маса пари рідини в одиниці об'єму сухого або вологого газу в нормальних умовах.

Відносна вологість, або ступінь насичення газу парами рідини, визначається як відношення маси пари в одиниці об'єму до максимально можливої маси пари в одиниці об'єму при тій же температурі, виражене в %.

Для вимірювання концентрацій складових газів використовується ефект випромінювання практично всього спектра електромагнітних коливань, починаючи з радіохвиль і закінчуючи  $\alpha$ -випромінюваннями. Найбільш широке застосування мають випромінювання інфрачервоних, видимих і ультрафіолетових ділянок спектра. Аналізатори, що працюють із випромінюваннями цих ділянок спектра, називають **фотометричними**. В аналізаторах використовуються явища поглинання, відбиття і розсіювання електромагнітного випромінювання аналізованою речовиною. Аналізатори, засновані на явищі поглинання електромагнітного радіочастотного спектру випромінювання, називають *абсорбційнооптичними* і *абсорбційно метричними*. Аналізатори рідин і газів, засновані на явищі поглинання електромагнітного випромінювання видимої частини спектра, називаються *фотоколориметрами*.

У силу того що світло різних довжин хвиль має різні коефіцієнти переломлення при розробці фотоколориметричних аналізаторів, для забезпечення необхідної чутливості застосовують фільтри, що дозволяють використовувати ту частину спектра, яка найбільшою мірою змінюється при проходженні через аналізоване середовище.

**Оптичні абсорбційні газоаналізатори** знайшли широке застосування як при якісному, так і при кількісному аналізі складу речовин, а також при проведенні різноманітних наукових досліджень і при вирішенні аналітичних задач в різних галузях виробництва.

Такий широкий спектр застосувань абсорбційних аналізаторів пояснюється рядом привабливих характеристик:

- висока селективність вимірювання компонентів складних сумішей;

- висока чутливість вимірювання;
- можливість проводити аналіз параметрів речовин в реальному масштабі часу;
- простота аналізу широкої гами речовин від атомів і молекул до складних сумішей.

Абсорбційні аналізатори застосовуються в широкому спектральному діапазоні, який простягається від ультрафіолетового ( $\lambda = 12 \div 380 \text{ нм}$ ) охоплює видимий діапазон ( $\lambda = 380 \div 760 \text{ нм}$ ) доходить до далекого інфрачервоного діапазону ( $\lambda = 760 \div 106 \text{ нм}$ ).

Оптичні абсорбційні газоаналізатори дозволяють аналізувати ароматичні і гетероциклічні з'єднання, ацетилен і т.п., а із неорганічних – метан, хлор, фосген, двоокис сірки, двоокис азоту, карбоніл нікелю, ртуть, озон та багато іншого.

Схемні і конструктивні виконання аналізаторів, у роботі яких використовується випромінювання видимої частини спектра, досить різноманітні. Колориметричні аналізатори класифікують залежно від числа джерел і приймачів випромінювання, числа використовуваних променів і наявності попереднього перетворення аналізованої речовини.

Щоб мати увагу про конкретні газоаналізатори розглянемо на прикладі деякі із них, вони використовуються в різних технологічних процесах де необхідно виявляти гази які реєструє даний газоаналізатор.

Газоаналізатор "Іонолюкс" фірми Hartman & Braun призначений для визначення малих концентрацій різних газів ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  тощо) в технологічних процесах. Схема комбінована структурна газоаналізатора "Іонолюкс" представлена на рисунку 2.2

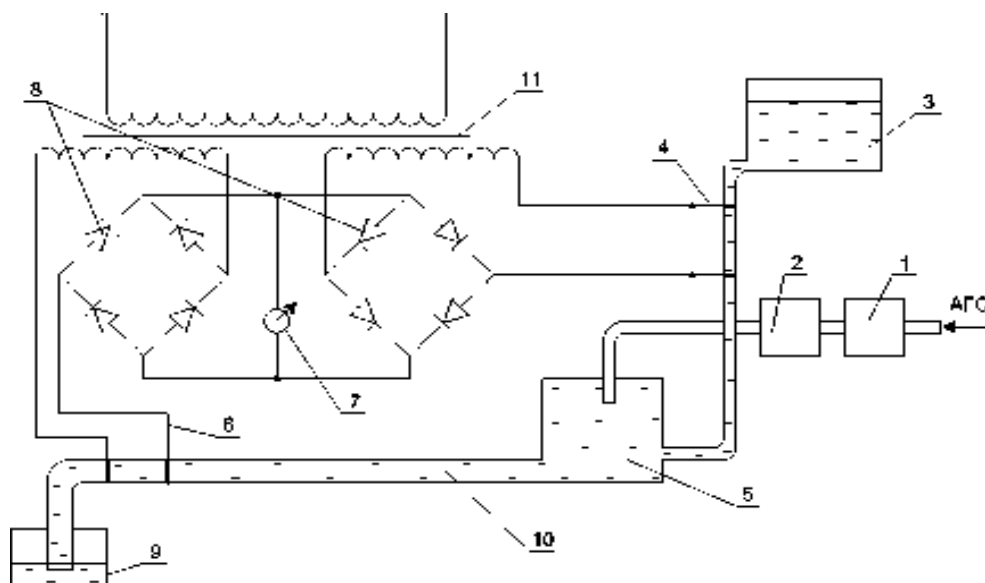


Рисунок 2.2 - Схема комбінована структурна газоаналізатора "Іонолюкс".

1 - моностат, 2 - витратомір, 3 - ємність з реакційним розчином, 4 - порівнювальні електроди, 5 - реакційна комірка, 6- вимірювальні електроди, 7 - мікроамперметр, 8- селеновий випрямляч, 9-зливна ємність, 10-трубка, 11-трансформатор.

Суміш проходить через моностат 1, капілярний витратомір 2 і подається в реакційну комірку 5, де вона контактує з розчином електроліта, що подається із ємності 3. Реакція з електролітом здійснюється в ємності 5 реакційної комірки і в трубці 10. Після абсорбування в розчині електроліта суміш по трубці 10 подається в ємність 9. На шляху розчину розташовано вимірювальні електроди 6. Порівнювальні електроди 4 знаходяться в трубці, де протікає свіжий розчин, що витікає із ємності 3. Живлення газоаналізатора здійснюється від мережі змінного струму через трансформатор 11.

Провідність розчину перед реакцією і після неї вимірюється диференційним методом. Вимірювальні електроди 6 розташовані в трубці 10, де протікає розчин після реакції. Для диференціального вимірювання струму застосовується мікроамперметр 7. Змінний струм перед цим випрямлюється селеновими випрямлячами 8, що включені за мостовою схемою. Мікроамперметр градуйовано об'ємних відсотках.

При визначенні концентрації H<sub>2</sub>S застосовується поглинаюча рідина - водний розчин CdCl<sub>2</sub>, або бромна вода. Розчин CdCl<sub>2</sub> вибирають для діапазону вимірювання 0-50 мг/м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>S. Якщо треба вимірювати менші концентрації, наприклад 0-5мг/м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>S, то використовується бромна вода.

Коли використовується бромна вода, то перед вимірюванням треба вилучити всі складові, котрі реагують з бромною водою, (наприклад вуглеводні тощо), або викликають зміну концентрації водневих іонів в розчині електроліту (NH<sub>3</sub>, пари кислот тощо).

Цей аналізатор може застосовуватися для визначення вмісту органічно пов'язаної сірки в суміші з воднем. Із газу, що аналізується, вилучають шкідливі домішки: карбоніл заліза ( за допомогою сілікагеля, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> і H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), PH<sub>3</sub> (за допомогою розчина ціаніда ртуті), пари води (за допомогою сілікагеля).

При цьому органічно пов'язана сірка переводиться в H<sub>2</sub>S в електричній печі при t=800°C в присутності платинового каталізатора.

За допомогою бромної води можна визначати мікроконцентрації речовини, наприклад, H<sub>2</sub>S при розбавленні 1:108.

Вимірювання здійснюється диференціальним методом, тому вплив температури незначний і його не враховують.

Таблиця 2.2 — Застосування газоаналізатора "Іонолюкс

| Діапазон | одиниці вимір.   | Визначаємий компонент |                    |  |                    |                    |                         |
|----------|------------------|-----------------------|--------------------|--|--------------------|--------------------|-------------------------|
|          |                  | H <sub>2</sub> S      | SO <sub>2</sub>    |  | CO <sub>2</sub>    | H <sub>2</sub>     | H <sub>2</sub> O (пари) |
| Мал.     | г/м <sup>3</sup> | 0-10 <sup>-4</sup>    | 0-10 <sup>-3</sup> |  | 0-10 <sup>-2</sup> | 0-10 <sup>-2</sup> | 0-0,1                   |
|          | %об'єм           | 0-10 <sup>-6</sup>    | 0-10 <sup>-4</sup> |  | 0-10 <sup>-3</sup> | 0-10 <sup>-3</sup> | 0-10 <sup>-2</sup>      |
| Велик    | г/м <sup>3</sup> | 0-0,5                 | 0-5                |  | 0-10               | 0-0,67             | 0-насих.                |
|          | %об'єм           | 0-10 <sup>-2</sup>    | 0-0,2              |  | 0-1,4              | 0-0,05             | 0-10 <sup>-2</sup>      |

Аналізатор "Мікрогаз" фірми Wosthoff призначений для вимірювання концентрації газів CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, NH<sub>3</sub> і H<sub>2</sub>S і газів, які можна попередньо спалити, довівши їх до CO<sub>2</sub> (наприклад CO, CH<sub>4</sub>).

Схема вимірювальної частини аналізатора "Мікрогаз" показана на рис.2.3

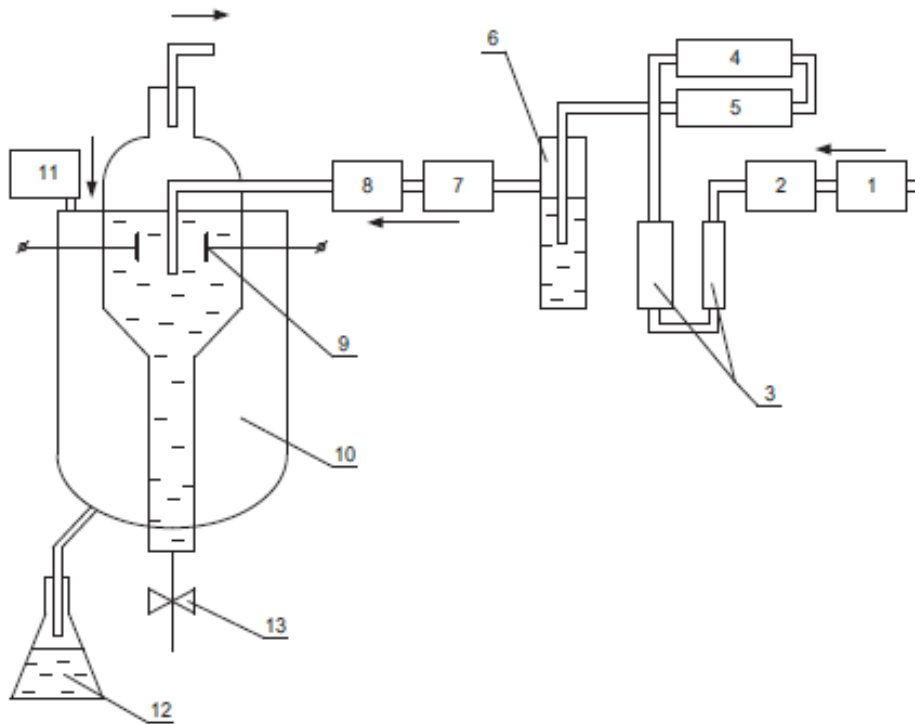


Рисунок 2.3 - Схема вимірювальної частини аналізатора

"Мікрогаз". 1- термостат; 2,3- змійовик, 4- газовий канал, 5,6-електроди, 7- вхід абсорбуючого розчину, 8- вхід суміші, 9-вихід.

В термостаті 1, що заповнений маслом, розміщено змійовик 2, який призначено для доведення і стабілізації температури до температури масляної бані. В скляному змійовику здійснюється поглинання суміші, що подається по входу 8, абсорбуючим розчином, що подається по входу 7. В газовому каналі 4 частина газу, що не прореагувала відділяється від рідини і потім разом з рідиною, що прореагувала з газом, вилучається через вихід 9.

Вимірювання електропровідності здійснюється за допомогою порівнювальних електродів 5 і вимірювальних 6 електродів, сигнал з яких потім подається, наприклад на мостову вимірювальну схему, де здійснюються відповідні перетворення і визначається концентрація компонента суміші.

При вимірюванні окису вуглецю CO він спочатку окислюється до двоокису вуглецю CO<sub>2</sub>, а потім поглинається в розчин Ba(OH<sub>2</sub>). Окислення здійснюється при температурі 110-120°C J<sub>2</sub>O<sub>5</sub> по реакції  $5CO + J_2O_5 = 5 CO_2 + J_2$ .

Йод, що утворився в реакції, уловлюється на ошурках срібла, тому що він заважає процесом абсорбції CO<sub>2</sub> в розчині гідроксидом барію Ba(OH)<sub>2</sub>.

Метан CH<sub>4</sub> перед вимірюванням спалюється при температурі приблизно 950°C в кварцовій трубці, яка заповнена гранульованим Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. CO<sub>2</sub>, що утворюється при цьому, поглинається Ba(OH)<sub>2</sub>.

Співвідношення між абсорбуючою рідиною Ba(OH)<sub>2</sub> і газом, що аналізується, підбирається так, щоби зміна електропровідності була якомога більша, а затримка показів аналізатора якомога менша. Зміна електропровідності залежить від концентрації абсорбуючого розчину.

Таблиця 2.3 — Перелік газів, що вимірюються аналізатором "Мікрогаз"

| Вимірюємий газ      | CO <sub>2</sub> (CO, CH <sub>4</sub> ) | SO <sub>2</sub>        | H <sub>2</sub> S        | NH <sub>3</sub>          | Cl <sub>2</sub>          |
|---------------------|--|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Найменший діапазон  | 0-50*10 <sup>-6</sup>                  | 0-1,6*10 <sup>-6</sup> | 0-1,6*10 <sup>-6</sup>  | 0-2*10 <sup>-6</sup>     | 1-10 мг/м <sup>3</sup>   |
| Найбільший діапазон | 0-0,5%                                 | 0-8 г/м <sup>3</sup>   | 0-100 мг/м <sup>3</sup> | 1-1000 мг/м <sup>3</sup> | 0-5000 мг/м <sup>3</sup> |

Аналізатор Пфундта призначений для визначення концентрації окису вуглецю (CO) в водні (H<sub>2</sub>), або в суміші водню з азотом при синтезі аміака NH<sub>3</sub>. При додатковому спалюванні вуглеводнів цей аналізатор може застосовуватися для вимірювання концентрації вуглеводнів (CH) у повітрі. Схема комбінована структурна аналізатора Пфундта показана на рис.2.4.

Суміш стабілізується по тиску за допомогою моностата 1, після чого газ проходить газовий промивач 2 з концентрованою H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> або з концентрованим KOH, а потім через колонку 3, яка заповнена в одній частині CaCl<sub>2</sub>, а в другій - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Окис вуглецю CO окислюється до CO<sub>2</sub> в шарі гранульованого I<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в пічці 4 при температурі 110°C. Йод, що виділився в цій реакції затримується на ошурках срібла в пічці 5, яка нагрівається до температури приблизно 250°C. Газ далі проходить крізь заповнений водою промивач 6, холодильник 7, витратомір 8, після чого вводиться в вимірювальну комірку 9. Вимірювальна комірка

знаходиться в кожусі 10, при цьому вона обігривається парами ацетону при температурі кипіння ( $56^{\circ}\text{C}$ ). Поверхня вимірювального ктроду дорівнює  $6\text{ см}^2$ , а відстань між електродами -  $1,5\text{ см}$ . В нижній частині вимірювальної комірки 9 є зливний кран, що дозволяє періодично міняти  $\text{J2O5}$  (приблизно 1 раз в декілька тижнів). Аналізатор дозволяє вимірювати концентрацію  $\text{CO}$  до  $0,001\%$ .

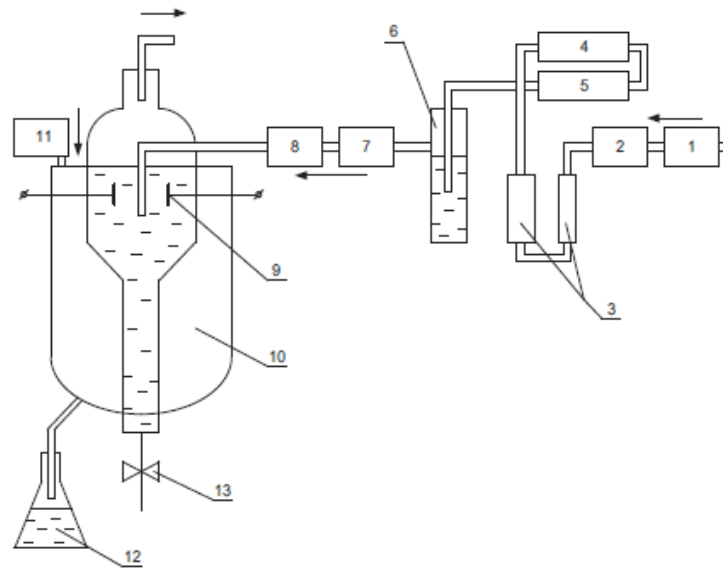


Рисунок 2.4 - Схема комбінована структурна аналізатора Пфундта.

1- моностат; 2 - газовий промивач; 3 - колонка с  $\text{CaCl}_2$  і  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; 4,5- пічка, 6- промивач, 7- холодильник; 8- витратомір; 9- вимірювальна комірка, 10 - кожух термостату; 11 - джерело парів; 12- відстійник; 13- зливний кран.

Для точних лабораторних вимірів давно вже застосовують лазерні газоаналізатори в основу принципу, дії яких покладено явище поглинання квантів світла визначеної довжини хвилі конкретними газами [2]. В залежності від інтенсивності світлового потоку на різних довжинах хвиль, що пройшов через об'єм із досліджуваним газом можна робити висновки про концентрацію газу в середовищі. Переваги цього методу очевидні, адже він дозволяє виявляти зразу кілька газів, а також їх похідних за один замір, без попередньої інформації про вміст дослідного зразка. Крім того, точність газоаналізатора обмежена лише роздільною здатністю дифракційної решітки приладу. Єдиним недоліком залишається те що до теперішнього часу в цих приладах для реєстрації

вихідного спектра використовується фотоплівка. Це значно відбивається на результатах вимірювання, адже при проявці на плівку та папір впливає велика кількість факторів, такі як час експозиції, концентрація проявляючої та закріплюючої суміші, дозволяюча здатність фотопаперу і таке інше, отже при однакових вхідних даних можна отримати різні вихідні.

Щоб позбутися вказаних недоліків, тобто неоднозначності між світловим потоком, що реєструється та результатами реєстрації замість фотопаперу стали використовувати інші світлочутливі пристрої з цифровою обробкою даних. При цьому принципи роботи газоаналізатора, в основі якого лежить поглинання світлового потоку окремими газовими компонентами на різних довжинах хвиль, в нових модифікаціях пристроїв залишається незмінною. До таких розробок можна віднести роботу лабораторії державних еталонів в області аналітичних вимірювань ДУП "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева" [2]. Ця лабораторія розробила прилад для точного аналізу складу досліджуваного газу, виходячи зі спектральних складових світлового потоку, що реєструється.

Багатокомпонентний оптикоабсорбційний газоаналізатор ОАС3600, розроблений у цій лабораторії, призначений для безупинного автоматичного виміру концентрацій широкого спектру газових компонентів шляхом реєстрації лінії поглинання, в ультрафіолетовій та видимій областях спектра випромінювання. В основі газоаналізатора ОАС3600 лежить спеціалізований автоматичний спектрофотометр, що працює за квазидвопроменевою схемою.

В якості приймача оптичного випромінювання застосований високостабільний прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ-лінійка). Газоаналізатор ОАС3600 конструктивно складається з двох блоків: вимірювального блоку й блоку керування. Пристрій забезпечує одночасний вимір концентрації всіх аналізованих компонентів. Висока селективність аналізу дозволяє виключити вплив компонентів, що заважають (води, вуглеводнів, СО, СО<sub>2</sub> і ін.), і мінімізує вимоги до системи пробовідбору й пробопідготовки. Газоаналізатор ОАС3600 дозволяє проводити виміри в широкому діапазоні концентрацій аналізованих

компонентів без перекалібровки і перемикання під діапазонів. У процесі виміру ведеться безупинний автоматичний контроль стабільності функціонування вузлів і блоків газоаналізатора. Система термокомпенсації газоаналізатора забезпечує незалежність показів від температури аналізованої проби. Відсутність безпосереднього контакту проби з елементами вимірювальної схеми дозволяє проводити аналіз компонентів у вологих і агресивних газах. Крім того, прилад може бути оптимізований для конкретної задачі, тобто якісного виявлення одного газу.

Не зважаючи на всі переваги такого пристрою у нього є деякі недоліки. Хоч у ньому використаний оригінальний метод дослідження та сучасна елементна база він дає похибку в діапазоні 1-10 %, що не припустимо для лабораторних вимірювань. Крім того він здатний виявляти речовини у досить не значній області спектру, а отже повної уяви про склад дослідного зразка отримати не можна. Як наслідок методу вимірювання можна зазначити великі габарити, що пов'язано з використанням у конструкції приладу кювети з дослідним зразком досить великого розміру (до 70 см.), що пов'язано з використанням оптичних приладів (лінз, конденсорів). Крім того джерелом випромінювання є ультрафіолетовий освітлювач, що різко звужує ширину спектру випромінювання, а відповідно і кількість ліній поглинання газів, можна спостерігати за допомогою такого приладу.

Метод внутрішньорезонансної лазерної спектроскопії (ВРЛС) [2] звільнений від вказаних недоліків і може бути застосований для отримання спектрів поглинання любых газоподібних речовин в лабораторних умовах. В цьому методі

досліджувана речовина поміщається всередину резонатора широкополосного лазера. Для видимого діапазону спектра можуть бути використані лазери на розчинах органічних барвників, для ближнього інфрачервоного діапазону – лазери на центрах забарвлення в кристалах.

В принципі резонатор такого лазера аналогічний до багатоходової кювети, але з тією суттєвою відмінністю, що тут всі неселективні втрати, обумовлені пропусканням дзеркал, відбиванням і розсіюванням випромінювання на

елементах резонатора і т.д., скомпенсовані підсиленням в активному середовищі. Втрати, обумовлені присутністю ліній поглинання з шириною, меншою від ширини однорідного контуру підсилення активного середовища, не компенсуються і, відповідно, проявляються у спектрі генерації лазера.

Більшість приладів газового аналізу поділяються на дві групи. В першій використовуються аналізуючі прилади на основі хімічних реакцій:

- електрохімічні;
- каталітичні;
- термокондуктометричні;
- напівпровідникові.

В другій групі використовуються оптичні аналізуючі прилади.

Аналізуючим приладам на основі хімічних реакцій властиві деякі недоліки, обумовлені їх конструктивом. Оскільки для аналізу необхідна реакція реагенту з середовищем застосування, реагент або аналізуючий датчик цілком підлягає заміні через певний час.

Крім того може бути досить істотним вплив побічних газів, залежність показань від температури, а інколи і вологості. Тому частіше за все в жорстких умовах експлуатації, а також в тих областях де необхідна висока надійність і швидкість реакції використовують оптичні аналізуючі прилади.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ВНУТРІШНЬОРЕЗОНАНСНОЇ ЛАЗЕРНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

#### 3.1 Обґрунтування обраного рішення

Більшість сучасних газоаналізаторів або мають низьку швидкодію як у хроматографів, або недостатню чутливість для виміру концентрацій, як у оптичних приладів.

Хроматографічний метод хоча й дає потрібні результати, але надто примхливий, покази його вимірів можуть залежати від різних параметрів, до того ж доведеться використовувати велику кількість датчиків та шукати компромісне рішення між чутливістю та точністю. Також потрібно мати апріорні знання про склад газу, який ми збираємося досліджувати, тобто потрібно заздалегідь підбирати датчики для виявлення газу, до того ж вимірювання можуть здійснюватися лише кваліфікованими фахівцями.

Метод спектрографії з використанням тонкоплівкових напівпровідникових реєстраторів або оптичних газоаналізаторів, побудованих на принципі абсорбції газу напівпровідником або поглинанні світлового потоку навпаки дає змогу судити про склад газу взагалі, до того ж у широкому спектрі концентрацій. Зона їх дії обмежена лише спектральною чутливістю датчика. При цьому контроль за досліджуваною речовиною може проводитись увесь час.

Найбільший інтерес представляє оптичний газовий газоаналізатор, що використовується в лабораторних дослідженнях. Точність із якою проводиться вимірювання в оптичному газоаналізаторі залежить тільки від параметрів вихідного потоку, розгалуження якого можна регулювати, змінюючи дифракційну решітку. Такий метод використовують вже давно, але не було пристрою здатного з високою точністю передати інтенсивність випромінювання конкретної хвилі.

Відомі лазерні газоаналізатори для дослідження атмосфери поки є складним і в технічному, і в експлуатаційному відношенні [2]. До очевидних

недоліків існуючих приладів слід віднести, в першу чергу - нестійкі випромінювальні характеристики лазерів, що значно знижує точність вимірювання аналітичних сигналів, крім того, більшість з них для реєстрації сигналів аналізу використовує фотопластину, що крім очевидних незручностей і втрати часу, різко знижує чутливість приладу.

В якості чутливого елемента аналізатора бажано використовувати резонатор багатомодового лазера, спектр генерації якого володіє підвищеною чутливістю до наявності ліній поглинання досліджуваних газів [2,3]. Аналітичний опис фізичних основ процесів, в рамках методу внутрішньорезонансної лазерної спектроскопії (ВРЛС) буде представлено в наступному параграфі. Випромінювання широкосмугового лазера, що містить інформацію про досліджувані гази, розкладається в спектр високодисперсним спектральним приладом і направляється на чутливий елемент фотоелектричного приймача.

Фотоелектричний спосіб є лінійним і дозволяє виробляти лінійні інтегрування за часом імпульсу генерації та обчислювати коефіцієнт поглинання на заданій частоті  $K_{\lambda}(\omega)$  (а отже і концентрацію газу  $n$ ), не застосовуючи тимчасового розгорнення спектру. Цей спосіб реєстрації має в порівнянні з фотографічним більш високу точність і більш широкий динамічний діапазон. При фотоелектричному способі реєстрації відпадає необхідність фотометрування мікрофотограм, а можливість виведення інформації безпосередньо на ЕОМ дозволяє позбутися від всіх трудомістких операцій і суттєво підвищити точність розрахунків

Тимчасова нестабільність спектру генерації при послідовному скануванні створила б неповторювану структуру спектра, досліджувані лінії на тлі такої структури не вдалося б помітити. Тому реєстрація спектрів, отриманих методом ВРЛС, повинна бути одночасною в усьому досліджуваному спектральному діапазоні. При цьому тимчасові коливання інтенсивності генерації повинні усереднювати спектральний розподіл інтенсивності  $H(w_0)$ , що представляє

практичний інтерес, і буде визначатися тільки спектром поглинання досліджуваної речовини.

Для вимірювання коефіцієнта поглинання в одній лінії достатньо було б двох фотоприймачів, один з яких вимірював би  $H(\omega_0)$  в центрі лінії, а інший - на близькій частоті  $\omega + \Delta\omega$ , де поглинання немає, тобто  $K_{\Lambda}(\omega_0 + \Delta\omega) = 0$ ;  
 $H(\omega_0 + \Delta\omega) = H_0(\omega_0 + \Delta\omega) \approx H_0(\omega_0)$ . Так можна було б безперервно контролювати концентрацію одного з газів, що заповнюють резонатор.

Для кількісного дослідження методом ВРЛС спектрів поглинання, що мають велике число спектральних ліній, необхідна багатоканальна система фотоелектричної реєстрації.

Сучасні спектральні методи є ефективним інструментом для аналізу різних речовин. Істотною перевагою цих методів є те, що відповідні прилади легко сполучаються з комп'ютерами, дозволяють реєструвати ультрамалі кількості речовини та накопичувати сигнали. Застосування ЕОМ не тільки прискорює отримання даних і підвищує їх надійність, але і створює нові методи дослідження. Однак нерідко ці методи застосовуються недостатньо критично, що може призвести до суттєвих помилок.

У роботі [2] було запропоновано новий тип газоаналізатора технологічних атмосфер в оптичному діапазоні - автоматизований лазерний комплекс на базі широкосмугового лазера, всередину резонатора якого поміщають досліджувану газову суміш

Сучасні методи спектральних досліджень передбачають введення спектральних картин в ЕОМ і їх електронну обробку в реальному часі.

Пристрої введення, зображень в ПК можна розділити на 3 класи: сканери фотозображень (ручні, листові, планшетні), цифрові фотокамери і мультимедіавідеопорти. Для фотосканерів характерне використання в якості датчика світлового випромінювання ПЗЗ-лінійки і швидкісного інтерфейсу обміну з комп'ютерами. Такі прилади найбільше підходять для введення

світлових картин, але відсутність опису протоколу обміну по інтерфейсу і системи команд сканера робить їх використання недоцільним.

Цифрові фотокамери, навпаки, легко піддаються програмного "злому", але дорого коштують і обмінюються з комп'ютером по повільному послідовному інтерфейсу (115кбайт). Вартість мультимедіавідеокамери найбільш висока, однак і в цьому випадку система незручна в програмуванні і не забезпечує достатнього оптичного дозволу.

Розв'язання вказаних недоліків можна усунути за допомогою пристроїв із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Висока стабільність лінійки ПЗЗ дає можливість передати напругу на виході з точністю до десятих частин вольт, що у свою чергу дозволяє перетворити дані в цифрову форму досить адекватно, навіть для наукових вимірів.

Як зазначалося, для отримання точних вимірів в лабораторних дослідницьких установках використовується лазерний газоаналізатор з реєстрацією вихідного світлового потоку на фотоплівці. Використовуючи досвід розробки оптичного газоаналізатора ОАС3600, описаного вище, та за допомогою сучасної елементної бази з'явилась можливість у спектрографічному методі відмовитись від фотопаперу і скористатись ПЗЗ, потім аналоговий сигнал перетворити у цифрову форму для збереження точності при передачі й простоті обробки інформації. Такі виміри можна проводити декілька разів на протязі хвилини, тобто практично безперервно, дискретність виміру залежить лише від випромінювання лазерної установки та швидкості передачі інформації у персональний комп'ютер (ПК). Отже проблема передачі інформації може бути вирішена.

Крім того до переваг даного методу можна віднести і те що не потрібна апріорна інформація про склад газу, всі складові не залежно від концентрації досліджуються одночасно, а отже за один вимір можна точно сказати, які гази чи суміші містяться в досліджуваному зразку. Ця відмінність спектрографічного методу дає незаперечну перевагу над іншими методами, саме тому його і покладено в основу роботи приладу.

Багатоелементні фоточутливі МДН - структури, в яких функція комутації сигналу здійснюється в самому обсязі напівпровідникового фоточутливого матеріалу - фоточутливі прилади з перенесенням заряду (ФППЗ). Ці прилади призначені для перетворення оптичного випромінювання в електричний сигнал, дія якого заснована на формуванні та ефективному перенесення дискретних фотогенеративних зарядових пакетів всередині напівпровідникових матеріалів. Для нас інтерес представляють фоточутливі прилади із зарядовим зв'язком (ФПЗС), в яких зарядові пакети передаються до вихідного пристрою внаслідок спрямованого переміщення потенційних ям і обсягами напівпровідника при передачі на його електроди у відповідній послідовності тактових імпульсів [5]. Перетворювач лінійний японського виробництва НАМАМАТСУ G9208 багатоелементний кремнієвий фотоелектричний прилад (ПЗЗ-лінійка). Робочий оптичний діапазон 0,9... 2,55 мкм. Число елементів 256, розміри яких близько 12,5 мкм.

### **3.2 Теоретичні дослідження методу внутрішньорезонансної лазерної спектроскопії**

Оперативне визначення складу газового середовища є актуальною проблемою для фізики, хімії, екології та інших наук.

Розвиток і вдосконалення методів і засобів газового моніторингу пов'язаний з розробкою і створенням автоматизованих приладів і автоматизованих систем на базі мікропроцесорної та обчислювальної техніки.

Великий інтерес для практики викликають методи, засновані на впливі досліджуваної речовини на параметри лазерного випромінювання. Метод внутрішньорезонансної лазерної спектроскопії дозволяє в лабораторних умовах дослідити спектри поглинання газоподібних речовин з малим коефіцієнтом поглинання та ідентифікувати домішки, що становлять  $10^{-5}$  частини суміші [3].

Згідно з методом внутрішньорезонансної лазерної спектроскопії, досліджувана речовина поміщається в резонатор лазера з широкою смугою

частот  $\omega$  спектру випромінювання з відрізка  $[\omega_0, \omega_n]$ . Такі лазери створені на розчинах органічних барвників, на склі з іонами неодиму та іншими методами. Резонатор такого лазера аналогічний багатоходової кювети з сумарною довжиною оптичного шляху  $S_{\text{ош}}$

$$S_{\text{ош}} = c \cdot T \cdot \frac{l}{L} \quad (3.1)$$

де  $c$  - швидкість світла в середовищі;

$T$ -ефективна тривалість генерації лазера;

$l$  - довжина кювети з досліджуваним речовиною в резонаторі;

$L$ -довжина резонатора лазера.

Спектральну інтенсивність генерації такого лазера зазвичай представляють у наступному вигляді:

$$H(\omega, t) = I_0(\omega, t) \cdot e^{-K_n(\omega) \cdot c \cdot t}, \quad (3.2)$$

де  $I_0(\omega, t)$  інтерпретують як спектральну інтенсивність генерації лазера при відсутності поглинаючої речовини в резонаторі.

Так як прилади зазвичай реєструють сумарну інтенсивність багатомодового спектру за час генерації лазера  $T$ , то в площині фотоприймача її можна представити у формі

$$H(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt = \int_0^T I_0(\omega, t) \cdot e^{-K_n(\omega) \cdot c \cdot t} \cdot dt \quad (3.3)$$

Якщо допустити, що інтенсивність  $I_0(\omega, t)$  за термін генерації лазера  $T$  не змінює свого значення, тобто  $I_0(\omega, t) = I_0(\omega)$ , то вираз 3.3 можна представити у вигляді

$$H(\omega) = \int_0^T I_0(\omega) \cdot e^{-K_n(\omega) \cdot c \cdot t} \cdot dt = -\frac{I_0}{K(\omega) \cdot c} \cdot e^{-K(\omega) \cdot c \cdot t} \Big|_0^{T_{\text{засв}}} = \frac{I_0}{K(\omega) \cdot c} \cdot (1 - e^{-K_n(\omega) \cdot c \cdot T_{\text{засв}}}) \quad (3.4)$$

На підставі даного виразу спектральну інтенсивність  $H(\omega_i)$  можна представити, як незалежну від часу функцію частоти світлового потоку  $\omega$

$$H(\omega_i) = H_0(\omega_i) \cdot (1 - e^{-K_n(\omega) \cdot c \cdot T_{засв}}), \quad (3.5)$$

де  $H_0(\omega_i) = \frac{I_0}{K(\omega_i) \cdot c}$ , а  $K(\omega_i)$  - коефіцієнт поглинання досліджуваною

речовиною інтенсивності світлового потоку на частоті  $\omega_i$  (3.6).

$$K_{\text{погл}}(\omega_i) = \frac{1}{c \cdot T_{\text{опр}}} \cdot f^{-1} \left( \frac{H(\omega_i)}{H_0(\omega_i)} \right). \quad (3.6)$$

Звідси, значення спектральної інтенсивності випромінювання в рівномірній сітці частот відрізка  $[\omega_0, \omega_n] \in \omega_0, \omega_1, \dots, \omega_n$   $\omega_i = \omega_{i-1} + h$ , визначені за виразом 3.5 дорівнюють

$$H(\omega_0), H(\omega_1), \dots, H(\omega_n) \quad (3.7)$$

Так як вимірювальні прилади вносять додаткові похибки, то дійсні значення спектральної інтенсивності (3.7) можна представити у формі спектра

$$H(\omega_0) + \delta_0, H(\omega_1) + \delta_1, \dots, H(\omega_n) + \delta_n \quad (3.8)$$

Наприклад, як результат такої реєстрації, можна представити спектр поглинання атмосферного кисню (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 - Спектр поглинання атмосферного кисню

Цей спектр є типовим спектром поглинання. Наявність у резонаторі досліджуваного речовини призводить до появи піків поглинання спектру

(провалів). Піки поглинання спектру відповідають лініям поглинання газів досліджуваної суміші і дозволяють визначити вид і кількість цих газів.

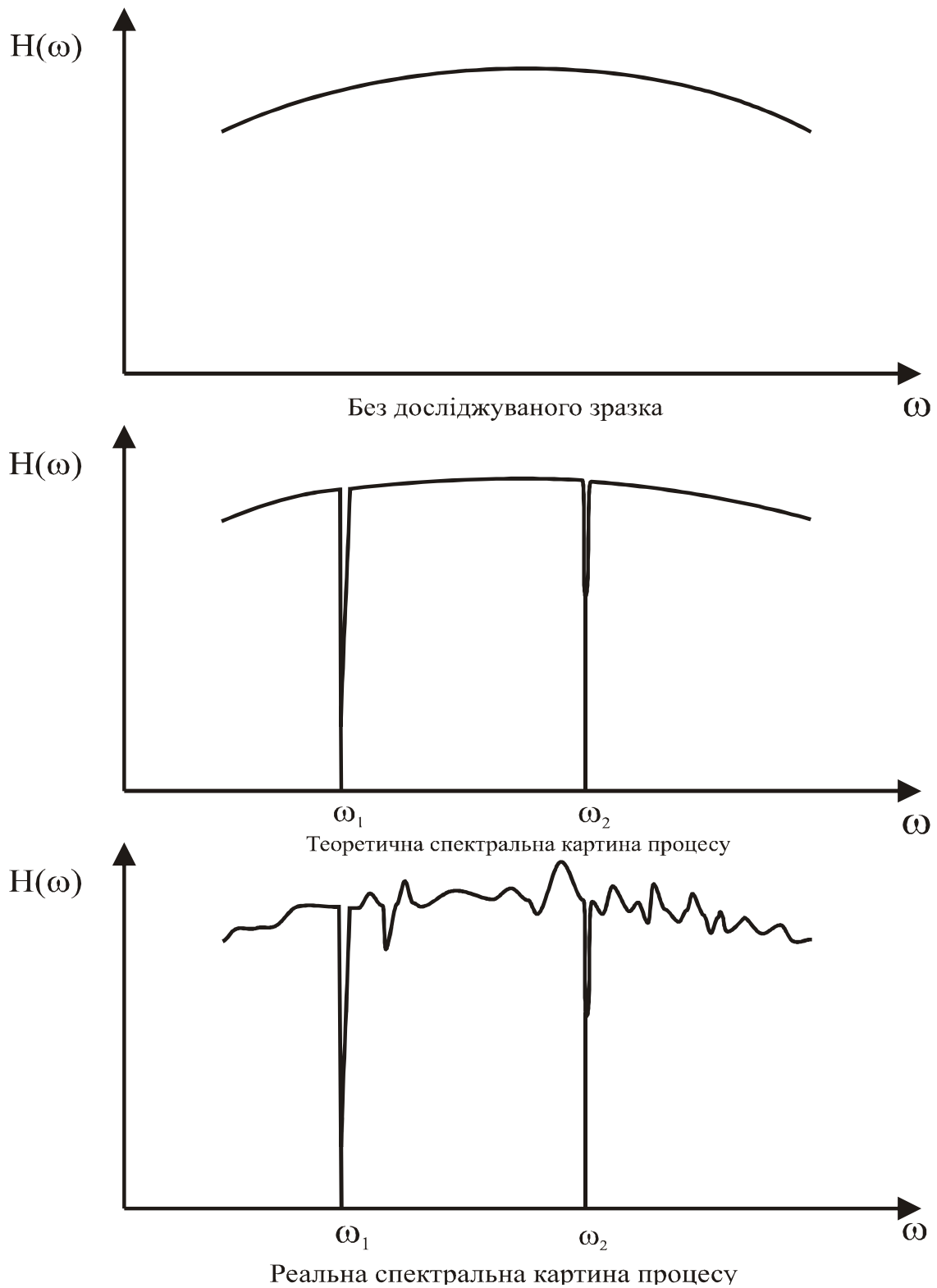


Рисунок 3.2 – Зображення спектру поглинання газових компонентів

Логіку поглинання спектральної інтенсивності  $H(\omega_i)$  багатомодового світлового потоку газовими компонентами досліджуємої суміші на окремих спектрах  $\omega_i$  і методику визначення цих компонентів в суміші наглядно ілюструють криві зміни  $H_i(\omega_i)$  (без дослідного зразка, теоретична, та реальна спектральна картина процесу) представлені на рисунку 3.2.

Внаслідок нестійкості концентрації газових компонентів в суміші за часом шуму багатомодового спектрального світлового потоку  $I_0(\omega \pm \Delta\omega_1 t)$  та нестабільність коефіцієнту його поглинання  $K(\omega \pm \Delta\omega)$ , а також похибки реєстрації вихідної спектральної інтенсивності  $H(\omega \pm \Delta\omega)$  коливання фонові спектральної інтенсивності  $\Delta H(\omega_i)$  відносно її середнього значення  $\bar{H}(\omega_i)$  може вносити значну похибку у визначення концентрації тої або іншої газової компоненти .

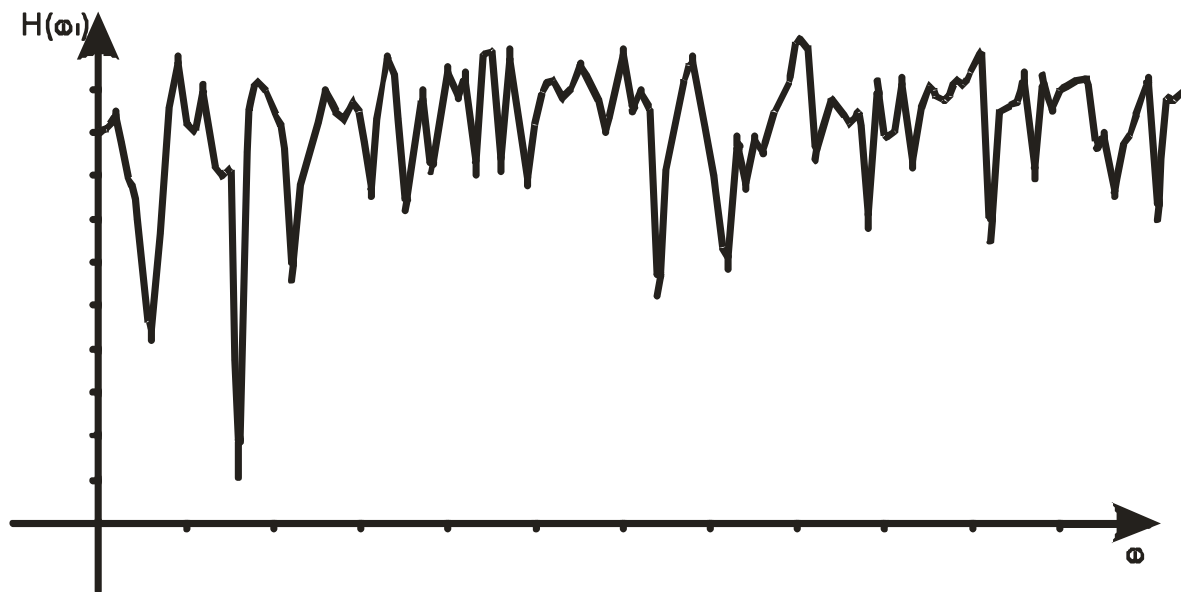


Рисунок 3.3 - Графік зміни спектральної інтенсивності на вході лінійного фотоприймача

Крім того, виникає питання, відносно якого базового показника визначається величина відхилення реєструємої спектральної інтенсивності на частоті її найбільшого поглинання:

$$\Delta H(\omega_i) = H(\omega_i) - H_0(\omega_i) \quad (3.9)$$

де  $H_0(\omega_i)$  - спектральна інтенсивність без впливу газового компоненту.

Існують різні методи визначення базових значень спектральної інтенсивності  $H_0(\omega_i)$ . В роботі [4] розкривається метод визначення опуклої кривої  $H_{\text{опукл}}(\omega_i)$  спектральної інтенсивності, на підставі методу Ланцоша шляхом аналізу емпіричних даних згладжування в цілому, за допомогою розкладання в ряд Фур'є, і який виступає в якості базового параметра для оцінки величини відхилення на частоті поглинання (рисунок 3.4).

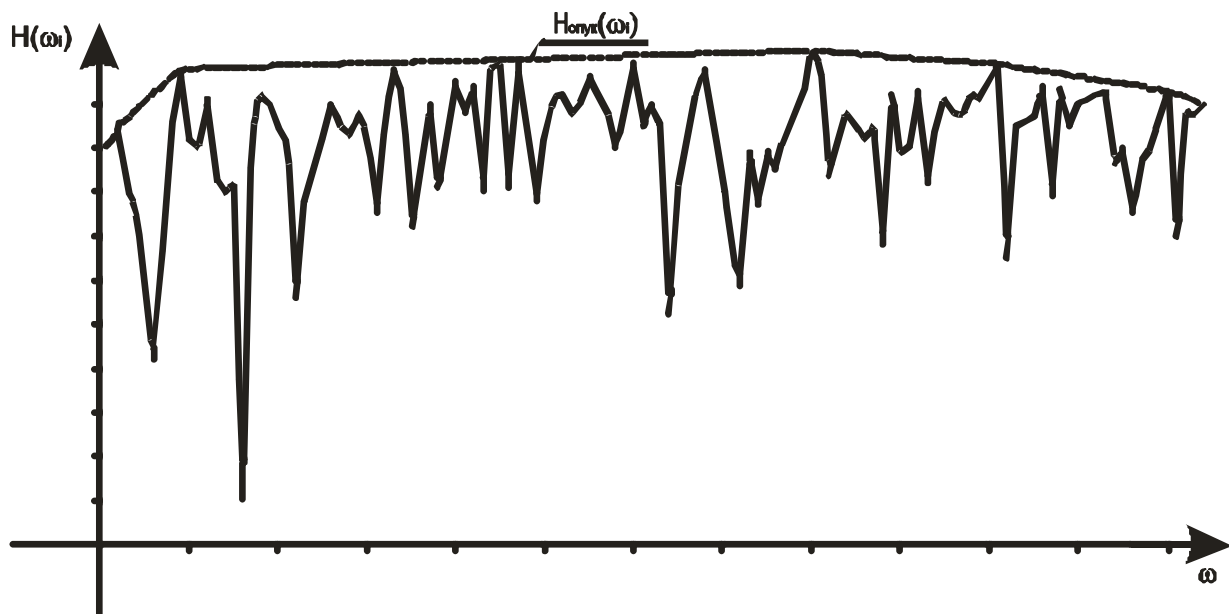


Рисунок 3.4 - Графік зміни опуклої кривої  $H_{\text{опукл}}(\omega_i)$  визначеної за методом Ланцоша.

Підставою для цього є опуклість вгору ідеально спектру поглинання  $H_0(\omega_i)$ . Метод Ланцоша стійкий щодо похибок значень апроксимуємої функції в крайніх точках апроксимації. Крім того, цей метод потребує спершу обчислення опуклої кривої  $H_{\text{опукл}}(\omega_i)$  за результатами емпіричних даних отриманих за весь спектр вимірювання і лише після цього визначаються піки поглинання і концентрація суміші.

В даній роботі пропонується більш простий і практичний метод послідовного визначення усередненого значення вимірів спектральної інтенсивності за трьома черговими точками виміру.

$$\bar{H}(\omega_{i+1}) = \frac{H(\omega_i) + 2H(\omega_{i+1}) + H(\omega_{i+2})}{4}. \quad (3.10)$$

де  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

$$h = \Delta\omega = \frac{\omega_n - \omega_0}{n} \quad (3.11)$$

де  $n$  – прийняте число вимірів.

При цьому враховується, що якщо відхилення значення  $H(\omega_{i+1})$  або  $H(\omega_{i+2})$  то:

$$\begin{aligned} \Delta H(\omega_{i+1}) &= |H(\omega_{i+1}) - H(\omega_i)| \geq 10\% \text{ від } \bar{H}(\omega_i), \\ \Delta H(\omega_{i+2}) &= |H(\omega_{i+2}) - H(\omega_i)| \geq 10\% \text{ від } \bar{H}(\omega_i). \end{aligned} \quad (3.12)$$

При розрахунках приймаємо  $H(\omega_{i+1}) = \bar{H}_6(\omega_i) \pm 0.1\bar{H}_6(\omega_i)$  або  $H(\omega_{i+2}) = \bar{H}_6(\omega_i) \pm 0.1\bar{H}_6(\omega_i)$  цим виключається вплив на визначення усереднених значень  $\bar{H}_6(\omega_i)$  дії факторів поглинання (піків поглинання). Звичайно це вносить деяку фіксовану похибку у визначення концентрації газових компонентів яка не перевищує величину шуму (рис.3.5).

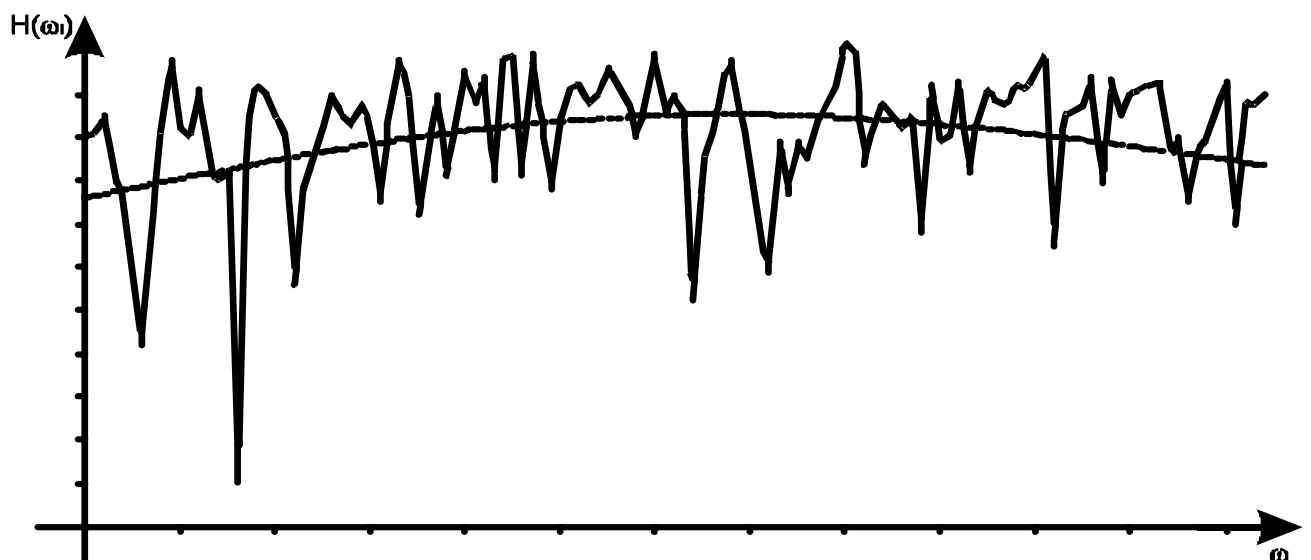


Рисунок 3.5 - Графік визначення усередненої кривої  $\bar{H}(\omega_i)$ .

За цим методом величина відхилення фактичних значень спектральної інтенсивності  $H(\omega_i)$  від усередненої  $\bar{H}(\omega_i)$  визначається виразом:

$$\Delta H(\omega_i) = H(\omega_i) - \bar{H}(\omega_i) \quad (3.13)$$

Частоти на яких це відхилення буде перевищувати 10% від  $\bar{H}(\omega_i)$  можна прийняти за зафіксовані газові компоненти.

Тому класична технологія визначення складу суміші методом внутрішньо-резонансної лазерної спектроскопії і сучасної елементної бази яка б фіксувала спектральні характеристики газів (ПЗЗ-лінійка) є завданням даної магістерської роботи.

## **4. ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПОБУДОВИ ПРИСТРОЮ РЕЄСТРАЦІЇ ОБСЯГІВ ВМІСТУ ГАЗОВИХ КОМПОНЕНТІВ ЗА МЕТОДОМ ВНУТРІШНЬОРЕЗОНАНСНОЇ ЛАЗЕРНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ**

### **4.1 Опис структурної схеми пристрою з ВРЛС**

Структурна схема установки приведена на рисунку 4.1. Джерелом світла у схемі є аргонний лазер робота якого підпорядковується керуючим імпульсом процесора. Оскільки лазерне випромінювання має дуже вузький спектр і незначні відхилення (розсіювання) у просторі то використовувати його при дослідженнях спектральних характеристик газів не можливо. Для виправлення цієї ситуації служить резонатор зібраний на дзеркалах М1 – М3, що забезпечують формування паралельного пучка променів та достатню його розбіжність. До того ж, для отримання чіткої спектральної картинки потрібно щоб промінь пройшов доволі велику відстань у досліджуваному зразку, ця функція реалізується саме дзеркалами М2 та М3. між якими промінь відбиваючись проходить відстань у кілька десятків кілометрів і зважаючи на виконання дзеркал, практично не зазнає втрат та відхилень у паралельності променів. Саме між цими дзеркалами і розміщується дослідний зразок, тобто пропускається струмінь газу, склад якого потрібно дослідити.

Наближення лазерного випромінювання до ширини спектру білого світла здійснюється за допомогою використання органічних барвників. Це розчини органічних речовин складної структури на основі етилен гліколю, який забезпечує стабільність потоку рідини при помірному її використанні.

Під впливом лазерного випромінювання молекули, поглинаючи фотони, починають випромінювати кванти світла різної довжини та інтенсивності. Це, як було сказано вище досягається саме за допомогою складної структури органічного барвника. Так як органічні молекули у більшості своїй не однокомпонентні, то не відбувається різкого піднесення конкретної частоти випромінювання, тобто молекула не входить у стан збудження.

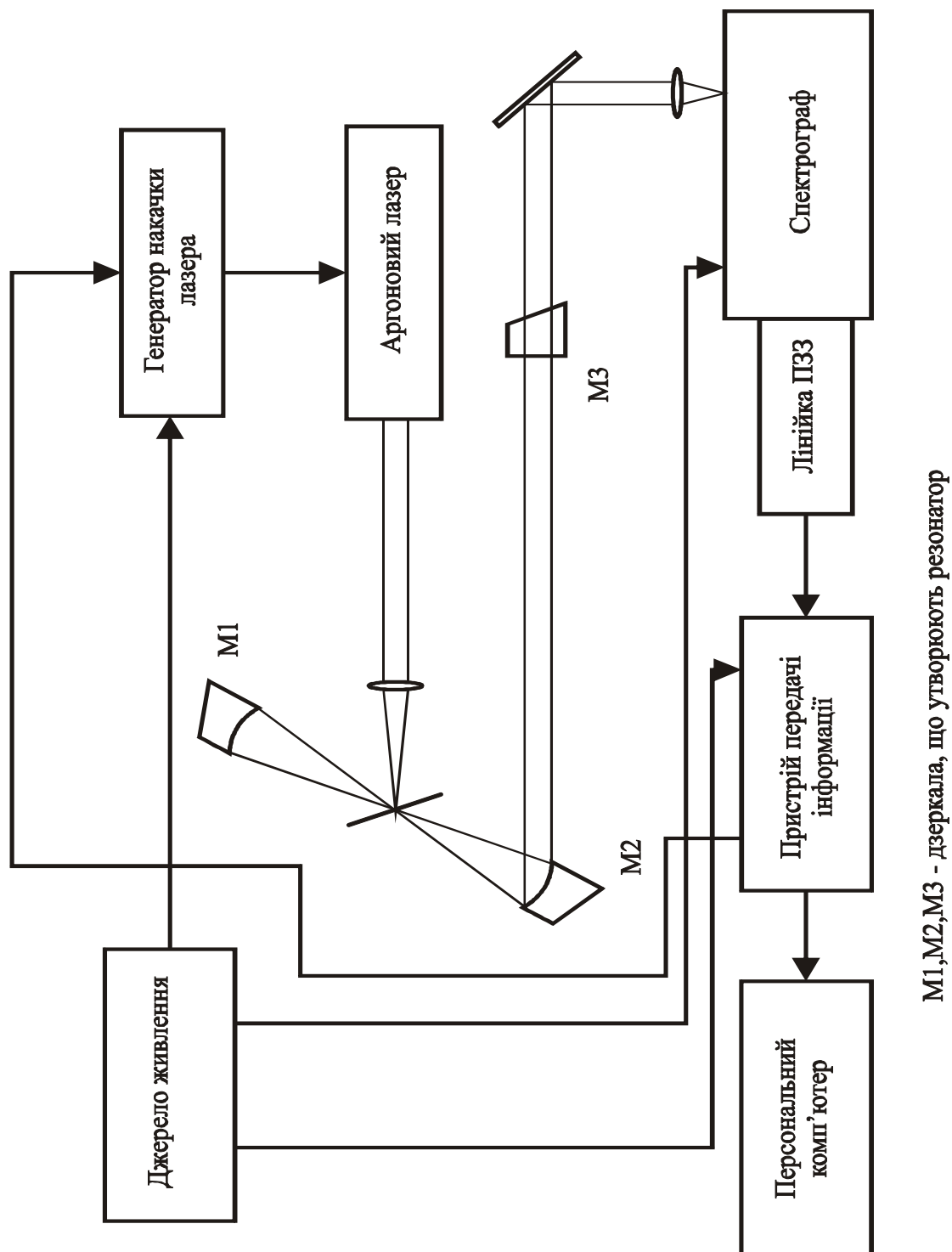


Рисунок 4.1 – Структурна електрична схема газоаналізатора

Полімерна структура дозволяє ще більше розширити спектр випромінювання за рахунок цис та транс ізомерів, що не зважаючи на одну хімічну формулу, мають різну молекулярну будову і ,відповідно, різні частоти

та спектри випромінювання. Незважаючи на максимальну стабілізацію та очищення потоку барвника на краях спектру випромінювання спостерігається зниження інтенсивності світлового потоку. Це пояснюється тим, що, по перше, випромінювання молекул не зважаючи на їхню неоднорідну структуру має деякий спектр і, по друге, чутливість пристрою ПЗЗ також не однакова на протязі усього діапазону вимірювання і дещо падає в областях на краях спектральної картини, саме це і призводить до неоднорідності та нерівномірності спектральної інтенсивності випромінювання у діапазоні вимірювання у стані спокою, тобто без дослідного зразка.

Після резонатора паралельний пучок променів попадає на похиле дзеркало, що проектує промінь на лінзу для збору пучка в точці на дифракційній ґратці. Система оптики та розділення світла по спектральним складовим знаходиться у спектрографі, головним функціональним пристроєм якого є дифракційна ґратка. Після того як отримується рознесена у просторі дифракційна картина яка проектується на лінійку ПЗЗ.

Оскільки робота пристрою пов'язана з реєстрацією спектральних складових білого світла, тобто визначення інтенсивності світлового потоку на кожній довжині хвилі окремо, то потрібно розкласти паралельний пучок променів на спектральні складові, а для цього використовується дифракційна ґратка [2]. Дифракційна ґратка представляє собою періодичну структуру, яка складається з вузьких та довгих щілин. Напруженість поля у деякій точці екрана  $P$  є суперпозицією великої кількості дифрагованих хвиль з однаковими векторами. Оскільки довжина щілин порівняно велика, то розглядається дифракція тільки в напрямі, перпендикулярному до країв щілин. Візьмемо одну з щілин за початок відліку, напруженість поля від неї у хвиль, що дифрагують на 2 і 3 щілинах буде відрізнятися тільки фазовим множником. З розгляду дифракції на періодичній структурі випливає, що світло після дифракційної ґратки розбивається на вузькі пучки, які розповсюджуються в чітко обмежених напрямках. Ширина головних максимумів визначається розміром максимуму на половині їх висоти. Щільність дифракційної картини (відношення відстані між головними максимумами до їх

ширини) буде дорівнювати  $1.13 \cdot N$ , де  $N$  – кількість штрихів. Тобто різкість дифракційної картини буде залежати від кількості штрихів дифракційної картини. Як відомо з теорії найбільша інтенсивність світлового потоку та найбільша чіткість дифракційної картини спостерігається у місці першого максимуму, тобто це місце при нормальному падінні паралельного пучка променів на ґратку де спостерігається найбільш вдалий прояв інтерференції з найбільшою точністю та різкістю. Саме у цьому місці для адекватної реєстрації та правильної інтерпретації даних повинен встановлюватися датчик. До того ж оскільки дифракційна картинка має симетричну будову відносно осі променя не має необхідності зчитувати її всю, можна лише зчитати частину першого максимуму від оптичної осі до його затухання. Хоча для підвищення точності та надійності приладу є можливість встановлювати дублюючий датчик для зчитування другої частини дифракційної картини. Тоді буде можливість проводити паралельний аналіз з двох окремих не залежних каскадів і виконувати корекцію на похибки підсилювальних ланцюгів та параметрів схеми, що дозволить ще більше підвищити точність визначення складу газових сумішей. Але оскільки метою проекту було дослідження можливості використання пристроїв ПЗЗ у динамічних процесах, то таке дублювання не доцільне через те що воно не веде до досягнення мети, а лише ускладнює схемну реалізацію пристрою.

#### **4.2. Дослідження можливостей використання ПЗЗ**

Перші прилади ПЗЗ були створені у 1970 році. Спочатку ПЗЗ застосовувалися як більш ефективні багатоканальні заміники фотодіодів, матриць фотодіодів. З найбільшим успіхом ПЗЗ-матриці реєстрували слабкі світлові потоки в таких галузях, як мікробіофізика, хімічна фізика, ядерна фізика, астрофізика. З 1975 року ПЗЗ почали активно впроваджуватися в якості телевізійних світлоприймачів. А в 1989 році ПЗЗ-детектори застосовувалися вже майже в 97% усіх телевізійних приймачів. Для порівняння, 10 роками раніше

ПЗЗ були представлені всього двома відсотками. Довгий час широкому застосуванню ПЗЗ-приймачів у телевізійній техніці перешкоджали недоліки в технологіях виготовлення світлочутливих елементів — кристалічних основ необхідного розміру. Світлоприймна область була неоднорідна по квантовому виходу, спостерігалася помітна геометрична нестабільність (плаваюча низька дозволяюча здатність), були присутні різного роду шуми як на малих масштабах (від пікселя до пікселя), так і на великих просторових масштабах (на шкалах 10-100 пікселів).

Тільки з розвитком і удосконалюванням технології створення ПЗЗ і з істотним стрибком у розвитку супутніх електронних засобів і, насамперед, зі збільшенням потужностей і швидкодії АЦП, стало можливим більш широке застосування ПЗЗ.

Здешевлення пристроїв ПЗЗ, зменшення їхніх габаритів і ваги, низьке енергоспоживання, простота і надійність в експлуатації дозволили застосовувати їх не тільки в професійних студіях, у наукових дослідженнях, у дорогих системах військового призначення, а й у побуті.

Спрощено прилад із зарядовим зв'язком можна розглядати як рядок близько розташованих МДН-конденсаторів. Структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структури) навчилися одержувати наприкінці 50-х років. Були знайдені і розвинуті технології, що забезпечували малу кількість дефектів і домішок у поверхневому шарі напівпровідника. Тим самим уже через 10 років були закладені передумови для винаходу приладів із зарядовим зв'язком.

З фізичної точки зору ПЗЗ цікаві тим, що електричний сигнал у них представлений не струмом чи напругою, як у більшості інших твердотільних приладів, а зарядом. При відповідній послідовності тактових імпульсів напруги на електродах МДН-конденсаторів зарядові пакети можна переносити між сусідніми елементами приладу. Тому такі прилади і названі приладами з переносом заряду чи з зарядовим зв'язком. Структура складається із шару кремнію р-типа (підкладка), що ізолює шару двоокису кремнію і набору пластин-електродів. Один з електродів має більш позитивний потенціал, чим

інші два, і саме під ним відбувається нагромадження заряду. Напівпровідник р-типа, одержують додаванням (легуванням) до кристалу кремнію акцепторних домішок, наприклад, атомів бора. Акцепторна домішка створює в кристалі напівпровідника вільні позитивно заряджені носії — дірки. Дірки в напівпровіднику р-типа є основними носіями заряду: вільних електронів там дуже мало. Якщо тепер подати невеликий позитивний потенціал на один з електродів осередку трифазного ПЗЗ, а два інших електроди залишити під нульовим потенціалом щодо підкладки, то під позитивно зміщеним електродом утвориться область збіднена основними носіями — дірками. Вони будуть відтиснуті всередину кристала, мовою енергетичних діаграм це означає, що під електродом формується потенційна яма. В основі роботи ПЗЗ лежить явище внутрішнього фотоефекта. Коли, у кремнії поглинається фотон, то генерується пара носіїв заряду — електрон і дірка. Електростатичне поле в області піксела “розтаскує” цю пару, витісняючи дірку в глиб кремнію. Неосновні носії заряду, електрони, будуть накопичуватися в потенційній ямі під електродом, до якого підведений позитивний потенціал. Тут вони можуть зберігатися досить тривалий час, оскільки дірок у збідненій області немає й електрони не рекомбінують. Носії, згенеровані за межами збідненої області, повільно рухаються — дифундують і, звичайно, рекомбінують із кристалічною решіткою напівпровідника перш, ніж потраплять під дію градієнта поля чи збідненої області. Носії, згенеровані поблизу збідненої області, можуть дифундувати в сторони і можуть потрапити під сусідній електрод. Заряд, накопичений під одним електродом, у будь-який момент може бути перенесений під сусідній електрод, якщо його потенціал буде збільшений, у той час як потенціал першого електрода, буде зменшений. Перенос у трифазному ПЗЗ можна виконати в одному з двох напрямків (вліво чи вправо). Усі зарядові пакети лінійки пікселів будуть переноситися в ту ж сторону одночасно. Чудова властивість ПЗЗ - властивість самосканування - полягає в тому, що для керування ланцюжком затворів будь-якої довжини досить всього трьох тактових шин. Дійсно, для передачі зарядових пакетів необхідно і досить трьох електродів: одного

передавального, одного приймаючого й одного ізолюючого, для розділення пари приймаючих і передавальних друг від друга, причому однойменні електроди таких трійок можуть бути з'єднані один з одним у єдину тактову шину, що вимагає лише одного зовнішнього виводу. Видно, що для його нормальної роботи в кожен момент часу принаймні на одній тактовій шині повинний бути присутнім високий потенціал, і принаймні на одній - низький потенціал (потенціал бар'єра). При підвищенні потенціалу на одній шині і зниженні його на іншій (попередньої) відбувається одночасна передача всіх зарядових пакетів під сусідні затвори, і за повний цикл (один такт на кожній фазній шині) відбувається передача (зрушення) зарядових пакетів на один елемент реєстра. Для локалізації зарядових пакетів у поперечному напрямку формуються так названі стоп-канали – вузькі смужки з підвищеною концентрацією основної легуючої домішки, що йдуть уздовж каналу переносу. Справа в тім, що від концентрації легуючої домішки залежить, при якій конкретно напрузі на затворі під ним утвориться збіднена область (цей параметр є не що інше, як гранична напруга МДП-структури). З інтуїтивних розумінь зрозуміло, що чим більше концентрація домішки, тобто чим більше дірок у напівпровіднику, тим суужніше їх відігнати всередину, тобто тим вище гранична напруга, при одній напрузі, тим нижче потенціал у потенційній ямі. Електроди ПЗЗ протягом деякого часу після винаходу найчастіше виготовлялися в одному шарі металу. Шар алюмінію товщиною близько 1 мкм наносили на прилад випаровуванням. Потім шляхом фотолітографії формували електроди. Найбільш критичним етапом у технологічному циклі виготовлення однорівневої структури цього типу є втравлювання міжелектродних зазорів. Для забезпечення гарного переносу зарядових пакетів треба, щоб потенційні ями сусідніх електродів перекривалися. Глибина потенційної ями залежить від ступеня легування кремнію і величини прикладеного до електрода потенціалу. Типові значення — одиниці мікрон. Звідси випливає, що міжелектродні зазори не повинні бути більше одиниць мікронів. Сумарна довжина цих вузьких зазорів у великих приладах дуже велика. Під час роботи приладу зображення, сформоване в області

нагромадження, швидко переноситься у вихідний реєстр зсуву. З реєстру зсуву зарядові пакети виводяться один за другим, послідовно через вихідний підсилювач, розташований на цьому ж кристалі кремнію. У цьому вузлі відбувається перетворення заряду в напругу для подальшої обробки сигналу зовнішньою електронною апаратурою.

Взагалі лінійка містить як правило накопичувальні елементи, роль яких виконують фотодіоди; по обидві сторони від лінійки накопичувальних елементів розташовуються реєстри зчитування (відповідно для парних і непарних елементів - білінійна організація). Номенклатура лінійок, що зараз випускаються, досить широка.

В нашому випадку використовується ПЗЗ- лінійка японського виробництва НАМАМАТСУ типу G9208 – це серія лінійних датчиків призначених для спектрофотометрії в ближній інфрачервоній області спектру. G9208 працює в широкому динамічному діапазоні і забезпечує високий коефіцієнт підсилення.

Лінійний перетворювач G9208 має наступні конструктивно-технічні показники:

- Кількість пікселів – 256;
- Розмір пікселю -  $50 \times 250$  мкм;
- Спектральний діапазон – 0,9 – 2,55 мкм.

На рисунку 4.2 представлені спектральні характеристики декількох серій лінійних перетворювачів. Із рисунка стає зрозумілим, що при виборі датчика ми обрали саме G9208 тому що він має найбільшу спектральну область ( $\lambda = 0,9 - 2,55$ ), це в свою чергу дає можливість фіксувати більшу кількість газових компонентів та різноманітних молекулярних з'єднань.

I(H)

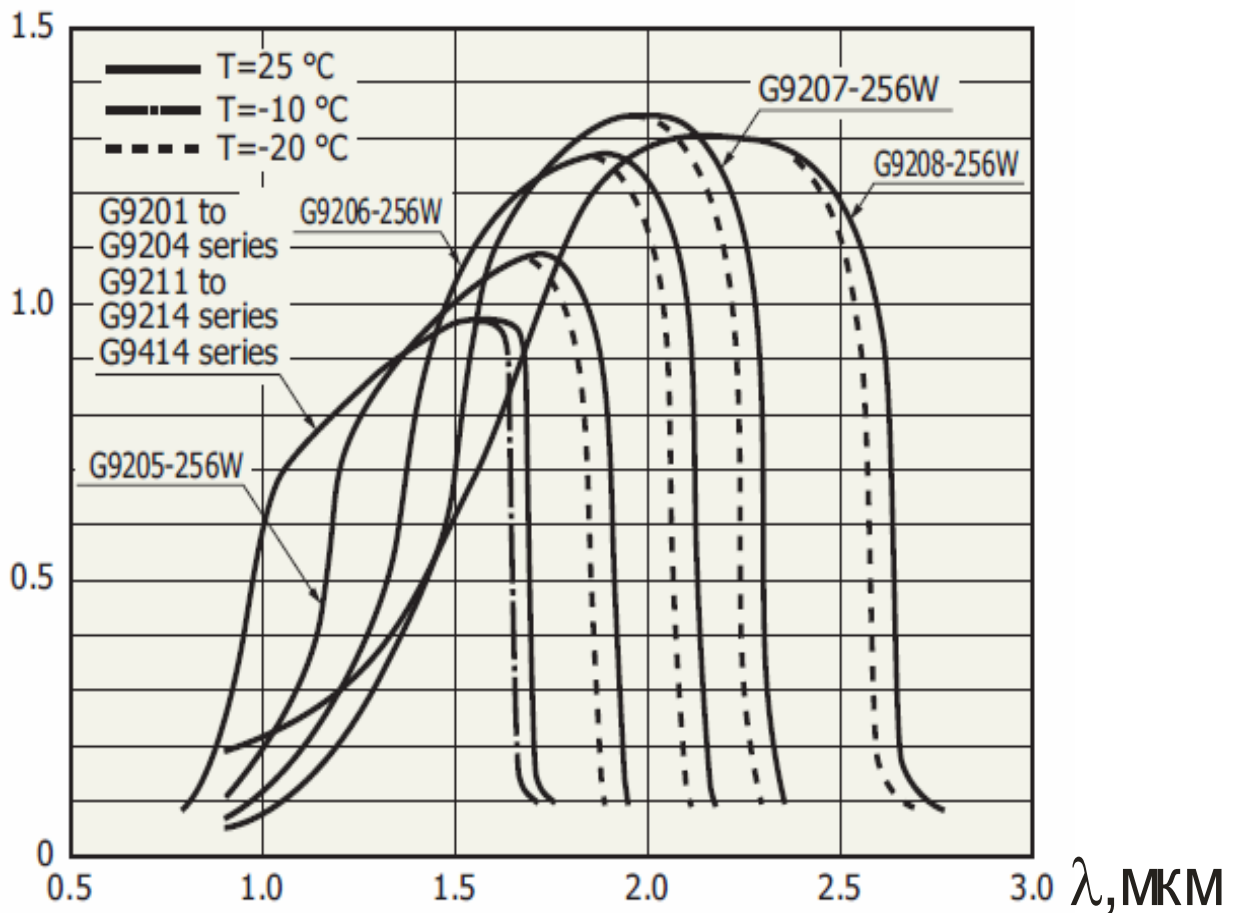


Рисунок 4.2 - Спектральні характеристики лінійних перетворювачів.

Для того щоб врахувати нелінійність спектральної чутливості ПЗЗ до дії рівномірного багатомодового світлового потоку, для кожної вимірюваної частоти вводиться коефіцієнт пропорційності  $K_i$ .

$$K_i(\omega_i) = \frac{A(\omega_i)}{A_{\text{MAX}}} \quad (4.1)$$

При цьому реальні значення вихідних вимірюваних величин  $A_{\text{розр.}}(\omega_i)$  (після зчитування з ПЗЗ) повинні визначатися співвідношенням на програмному рівні.

$$A_{\text{розр.}}(\omega_i) = \frac{A_{\text{вим}}(\omega_i)}{K_i(\omega)}, \quad (4.2)$$

де  $A_{\text{вим}}(\omega_i)$  - значення вимірів ПЗЗ лінійки.

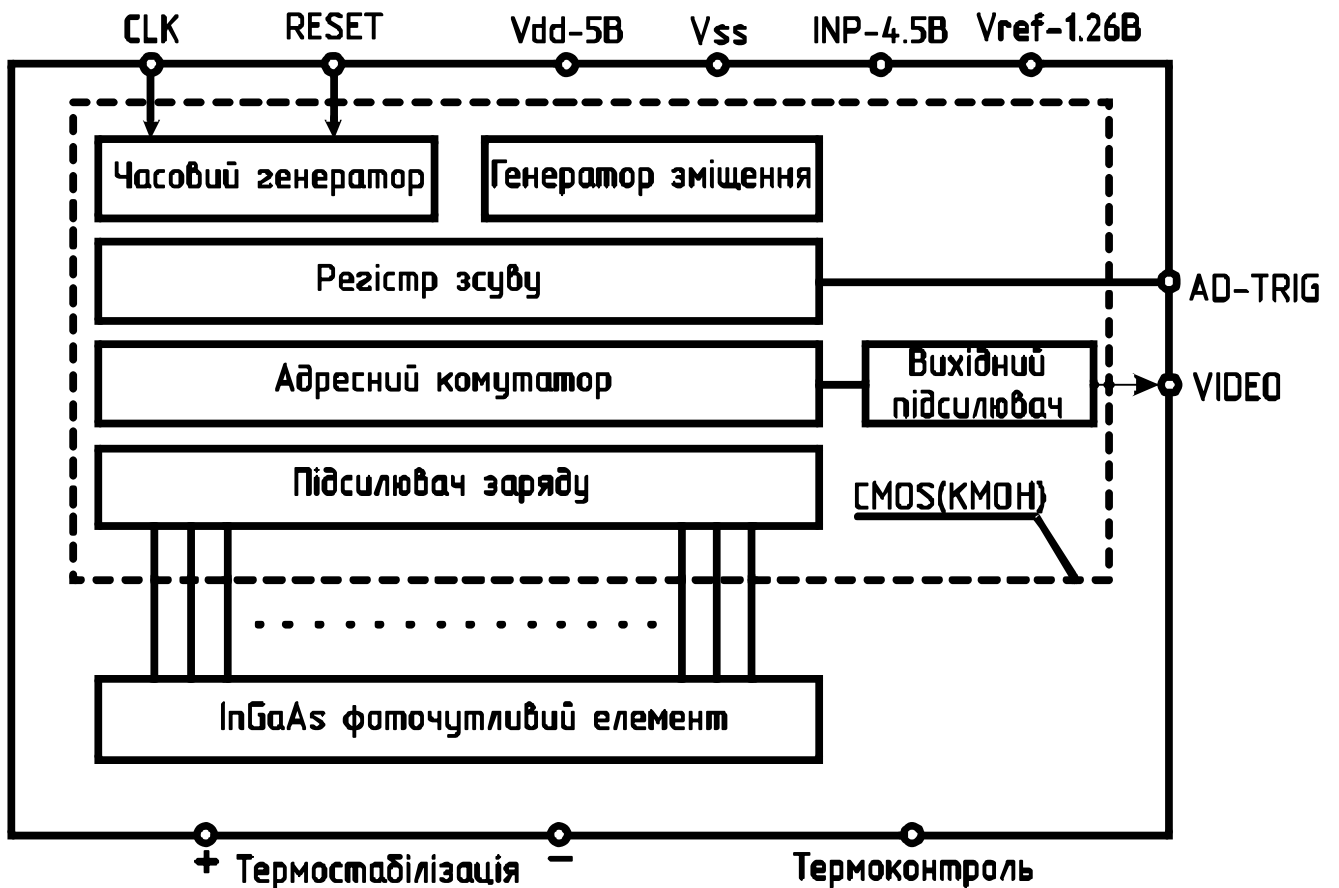


Рисунок 4.3 - Схема електрична структурна мікросхеми G9208.

Схема електрична структурна мікросхеми G9208 зображена на рис.4.3. Мікросхема G9208 виготовлена за технологією CMOS (КМОН-комплементарний метал-оксидний напівпровідник). Основною особливістю CMOS (КМОН) технологією в порівнянні з іншими технологіями таких як ТТЛ та ін., є досить мале енергоспоживання в статистичному режимі. Другою особливістю технології CMOS (КМОН) є вища швидкодія мікросхеми. Фоточутливий елемент виконаний за технологією InGaAs (Індій – Галій – Арсенід), ця технологія дає можливість забезпечувати фіксацію газових компонентів та різноманітних молекулярних з'єднань в ближній інфрачервоній області. Оптимальна температура мікросхеми  $T_{\text{опт}} = 25^{\circ}\text{C}$  при якій вона дає стабільні показання спектральної чутливості, тому для її термоконтролю передбачена термостабілізація.

## Виводи лінійного перетворювача та їх призначення:

CLK – тактовий сигнал;

RESET – скид і час інтегрування;

Vdd – напруга живлення мікросхеми (5В);

Vss – земля;

INP – вхід напруги заряду лінійного перетворювача;

AD-TRIG – цифровий вихід для запуску АЦП;

Video – аналоговий вихід відеосигналу;

Vref – установочна напруга (1,26В) для кіл компенсації зміщення.

Таблиця 4.1. Параметри ПЗЗ.

| №<br>п/п | Параметри ПЗЗ   | Познач.         | Min. | Ном.<br>значення. | Max. | Одиниця<br>виміру |
|----------|---|-----------------|------|-------------------|------|-------------------|
| 1        | Тактова частота.  | -               | 0.1  | -                 | 4    | МГц               |
| 2        | Тривалість частоти тактового імпульсу.                    | tpw(clk)        | 100  | -                 | -    | нс                |
| 3        | Тривалість фронту наростання та спаду тактового імпульсу. | tr(clk),tf(clk) | 0    | 20                | 100  | нс                |
| 4        | Тривалість імпульсу скидання                              | tpw(RES)        | 600  | -                 | -    | нс                |
| 5        | Тривалість фронту наростання та спаду імпульсу скидання   | tr(RES),tf(RES) | 0    | 20                | 100  | нс                |
| 6        | Тривалість фронту по наростанню                           | t1              | 50   | -                 | -    | нс                |
| 7        | Тривалість фронту по спаду                                | t2              | 50   | -                 | -    | нс                |
| 8        | Тривалість встановлення сигналу                           | t3              | -    | -                 | 600  | нс                |

Часова діаграма лінійного перетворювача типу G9208 зображена на рис.4.4 де CLK – це тактовий сигнал який формує мікроконтролер, RESET – час експозиції лінійного перетворювача. Сигнал RESET вибирається від необхідного часу засвічування ПЗЗ, а також він є визначальним для визначення часу експозиції.

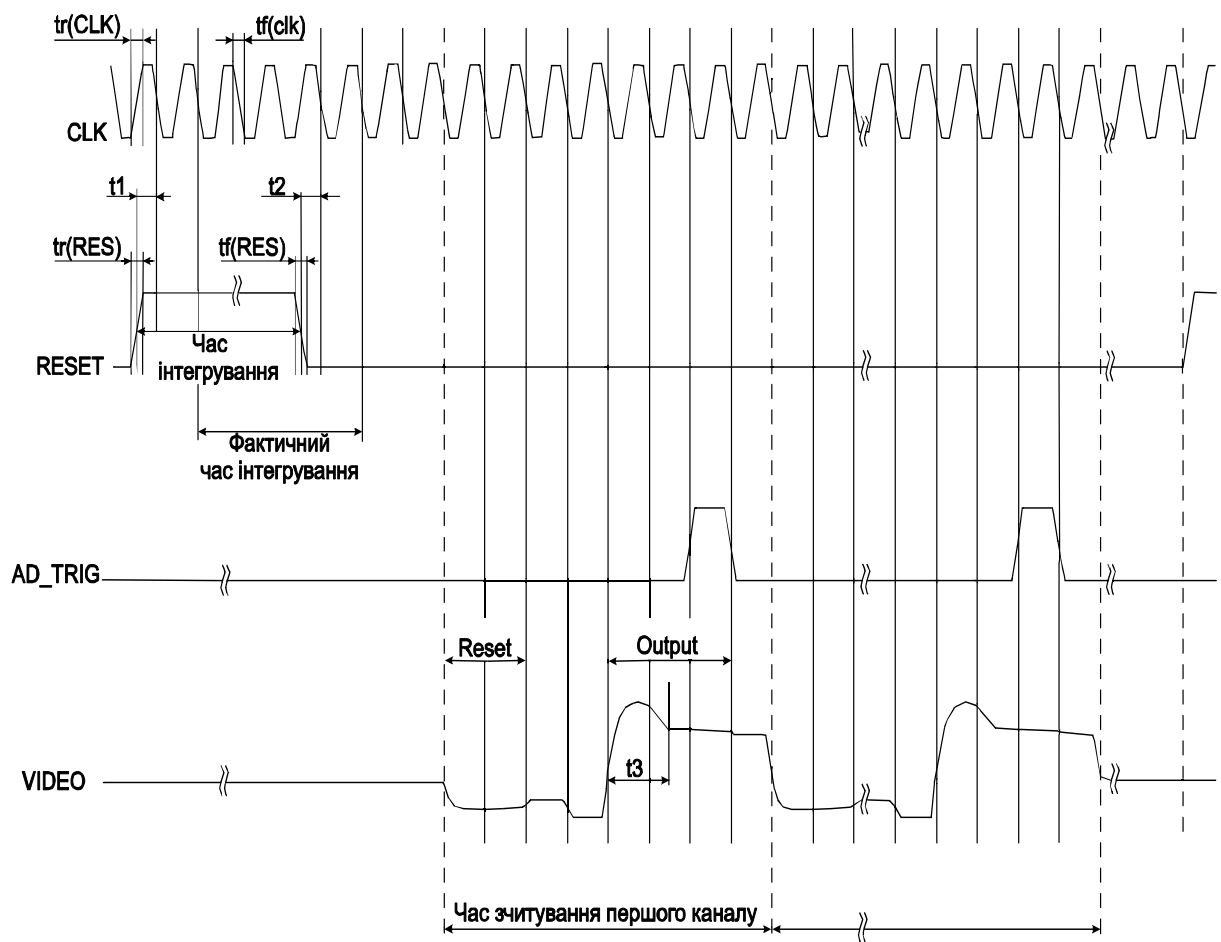
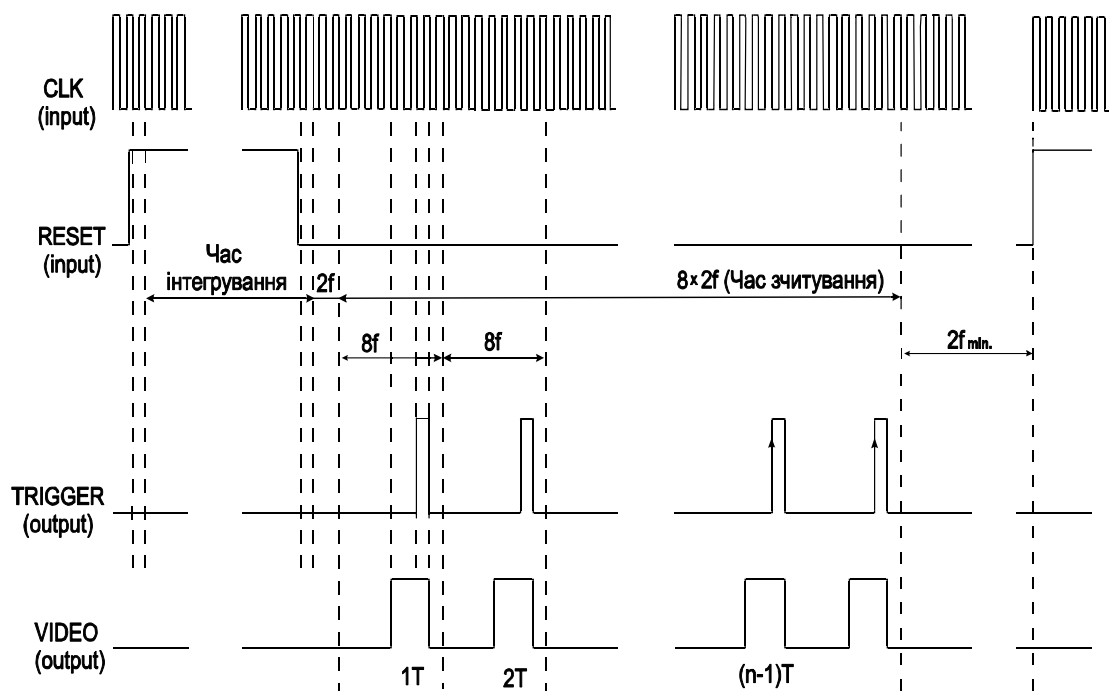


Рисунок 4.4 - Часова діаграма ПЗЗ лінійки.

Час експозиції зміщено на один період тактового сигналу і триває на протязі одного періоду після зняття сигналу RESET. AD-TRIG – це сигнал який виробляє лінійний перетворювач і інформує аналого – цифровий перетворювач (АЦП) про те що напруга на виході валідна (тобто відповідає дійсності) і необхідно виконувати запуск АЦП. Сигнал Video – це аналоговий вихід інформації з пікселів лінійного перетворювача.

### 4.3 Розробка блоку реєстрації та попередньої обробки інформації

В результаті теоретичного дослідження методу реєстрації газових складових аналізуємої суміші (розділ 3) за допомогою оптичного газового аналізатора в якому використовується принцип ВРЛС (розділ 4.1) та детального вивчення можливостей ПЗЗ (розділ 4.2) було розроблено функціональну електричну схему рис.4.5 (MP-8.091401.11.0001.07.01.E2).

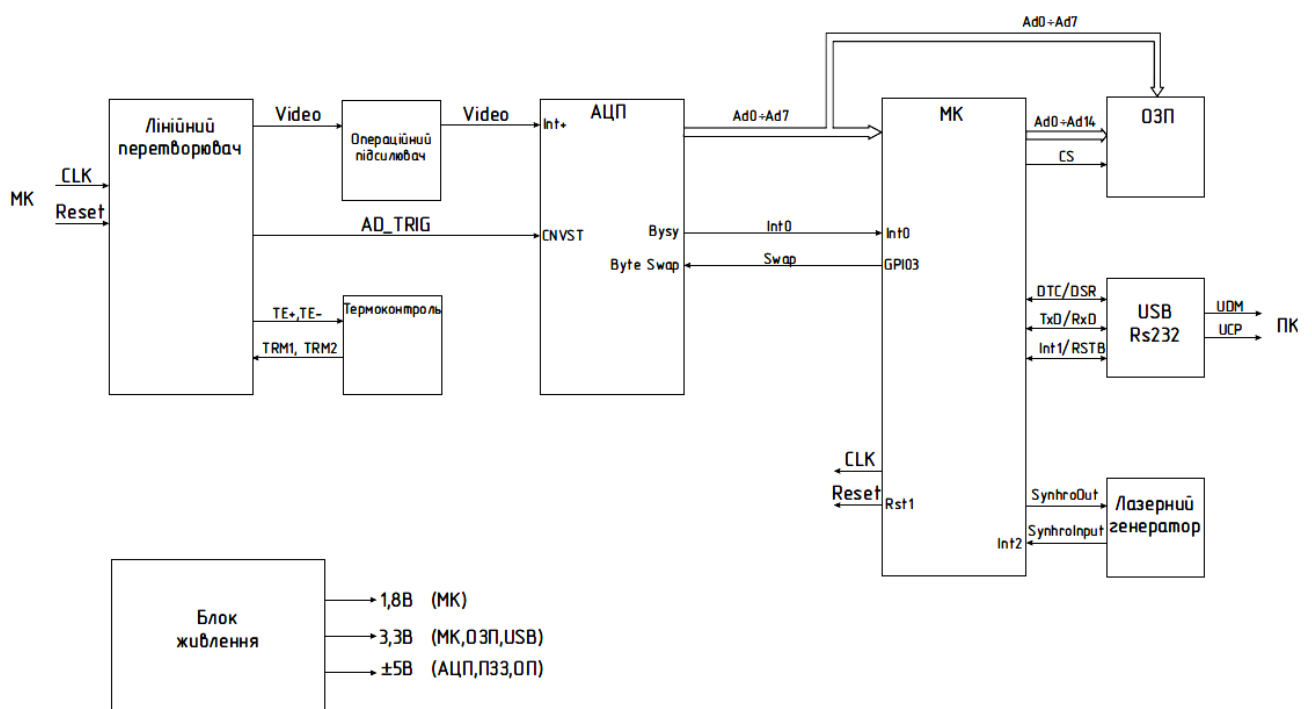


Рисунок 4.5 - Схема електрична функціональна блоку реєстрації попередньої обробки, та передачі інформації.

Розроблена схема електрична принципова, а також алгоритм роботи головної програми мікроконтролера блоку реєстрації, попередньої обробки та передачі інформації та головної програми визначення вмісту зареєстрованих газових компонентів в ПК рисунок 4.6.

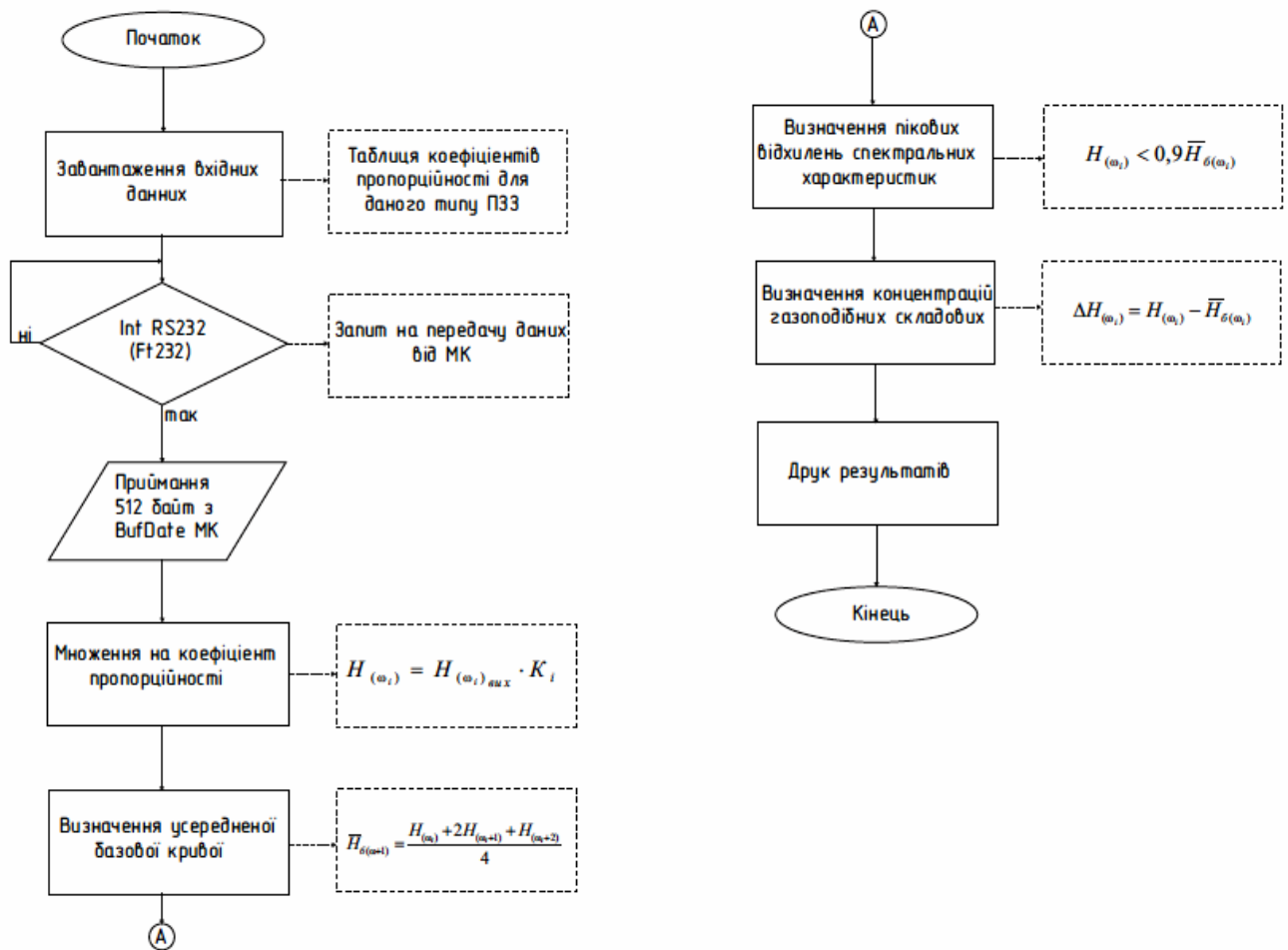


Рисунок 4.6 Алгоритм головної програми визначення вмісту зареєстрованих газових компонентів.

До складу розроблюваного оптичного газового аналізатора входять: лазерний генератор з резонатором та спектрографом (у подальшому лазерний генератор - ЛГ), блок реєстрації, попередньої обробки та передачі інформації до персонального комп'ютера з блоком живлення та ПК.

До складу блоку реєстрації, попередньої обробки та передачі даних рис.4.7 (MP-8.091401.11.0001.08.00.E3) входять: лінійний перетворювач типу G9208 (DA3); операційний підсилювач відеосигналів побудований на мікросхемах типу TS972ID (DA1:1÷DA6:2) та 74HCT00DB (DD1); стабілізатор температури ПЗЗ, який підключається через роз'єднувач X1; шістнадцятирозрядний аналого- цифровий перетворювач (АЦП) типу DA4; мікроконтролер (МК) типу S3F443FX (DA3), виконаний за архітектурою ARM7 з допоміжними мікросхемами: тактовий генератор на 64 МГц типу TCO-708X1A (GT1), мікросхеми скидання MC33164P-3 (DA8) та інвертори тактових сигналів DD4 типу 74HCT00DB; роз'єднувач X3 призначений для синхронізації роботи лазерного генератора та лінійного перетворювача; мікросхема FT232 (DD9) призначена для передачі даних від мікроконтролера до ПК через USB – порт (X5), роз'єднувач X4 забезпечує подачу напруги  $\pm 12\text{В}$  постійного струму; двох джерел опорної напруги DA5, DA7, які за допомогою трьох підсилювачів DA2:2, DA6:1, DA6:2 формують напругу 1,26В та 4,5В для лінійного перетворювача та АЦП. Блок живлення забезпечує подачу напруги +5В на регулятори опорних напруг DA5, DA7, на мікроконтролер, USB – інтерфейс, а також напругу -5В для роботи операційних підсилювачів.

Принцип роботи оптичного газоаналізатора пояснюється функціональною схемою яка зображена на рис. 4.1 принциповою електричною схемою блоку реєстрації, попередньої обробки та передачі даних, та алгоритмами роботи головних програм мікроконтролера та ПК.

Перед проведення контролю вмісту газу його подають в кювету ВРЛС. Запускається головна програма тестування на ПК: вводиться тип лінійного перетворювача, який визначає таблицю коефіцієнтів вирівнювання реєструємих вхідних відеосигналів, тестується USB – порт, визначаються параметри вихідних даних. Включається живлення блоку реєстрації, попередньої обробки та передачі даних. При цьому автоматично запускається головна програма МК параметри вимірювання в якій встановлені при завантаженні програми.

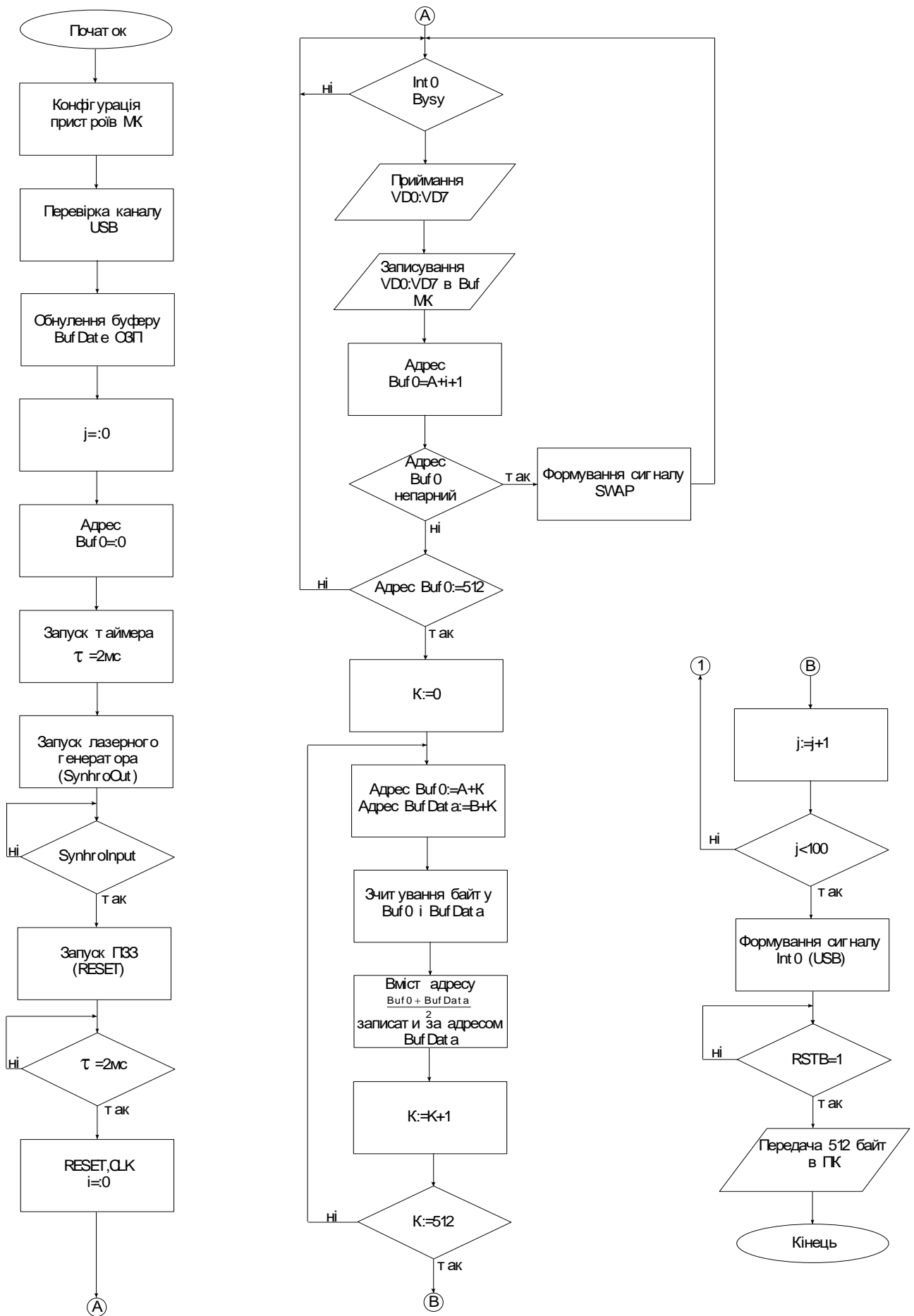


Рисунок 4.7 - Алгоритм роботи головної програми мікроконтролера.

Згідно з цією програмою спершу перевіряється порт RS-232 – USB, потім виконується обнулення вихідного буферу даних BufData ємністю 512 байт в ОЗП (DD2), організовується зовнішній цикл вимірювання ( $j:=0$ ) і формується початкова адреса для занесення даних з першого пікселя 256 – розрядної ПЗЗ лінійки. Ініціюється запуск таймера мікроконтролера і формується сигнал запуску лазерного генератора SynuroOut.

Після розкачки лазерного генератора виробляється сигнал SynuroOut який поступає на вхід Int2 мікроконтролера. В результаті цього переривання в мікроконтролері формується сигнал RESET, який на час засвічування ( $t_{засв} \geq 600\text{нс}$ ) блокує операції зсуву лінійного перетворювача. Через 2мс скидається сигнал RESET і з виходу CLK до ПЗЗ надходить серія тактових сигналів з періодом  $T_{CLK} = 1\text{мкс}$ , які переносять зформовані заряди 256 пікселей в зсувний регістр лінійного перетворювача (див. часову діаграму ПЗЗ рис.4.4), а потім послідовно переміщується на вихід зсувного регістру з періодом  $T_{зсуву} = 8 \cdot CLK$ . З виходу ПЗЗ – лінійки підсилені відеосигнали поступають на вхід In+ аналого – цифрового перетворювача DA4. Запуск АЦП по кожному відеосигналу  $V_i$  здійснюється сигналом AD-TRIG, який виробляється в ПЗЗ – лінійці за кожним шостим тактом восьмитактового циклу зсуву – зчитування кожного  $i$ -го пікселя (одного із 256).

Після перетворення сигналу з аналогово в цифровий на вході АЦП формується шістнадцятирозрядний код, який побайтно ( $VD0 \div VD7$ ) по сигналу Bysu в режимі обробки переривань Int0 передається в буфер акумулятор Buf0 ( $i=i+1$ ) і повторюється цикл оцифровки – запису амплітуди відеосигналу чергового пікселя. Після зчитування усіх 256 відеосигналів (512 байт інформації) програма переходить до усереднення даних попередніх та поточного вимірів. При цьому здійснюється почергове симетричне зчитування двох байт інформації – усереднення BufData і поточне Buf0 по кожному пікселю, потім ці значення додаються і результат ділиться на два  $[(BufDfta_i) + (Buf0_i)]/2$ . Отримане усереднене значення знову заноситься за адресою зчитування в буфер BufData

зовнішньої ОЗП. Потім формується адреса наступних двох байтів і цикли повторюються доки не визначаться середні значення виконаних вимірів по всіх 256 пікселях лінійного перетворювача. Збільшується номер виміру ( $j = j+1$ ) і програма знову переходить на повторний запуск таймера і виконання наступного виміру. Кожний цикл вимірювання триває біля 100 мс. Після виконання 100 вимірів в буфері BufData сформується усереднені значення рівнів засвічування кожного пікселя, номера яких відповідають довжині хвилі засвічуваного світлового багатомодового потоку. Після цього запускається підпрограма передачі 512 байт інформації зі швидкістю 988 Кбіт/с через порт RS232/USB (модуль FT232) в пам'ять ПК за сигналами DTC/DSR та TxD.

За сигналом Int RS232 від мікроконтролера програма контролю оптичного газоаналізатора приймає блок даних (512байт) від мікроконтролера і заносить його в пам'ять ПК. Після цього значення кожного пікселя (2 байта) зчитується із пам'яті і помножується на відповідний даному пікселю ПЗЗ – лінійки коефіцієнт вирівнювання  $K_i$ , тобто  $H(\omega_i) = \bar{H}(\omega_i)_{\text{вих}}$ . Таким чином виключається фактор впливу нелінійної спектральної характеристики ПЗЗ по чутливості.

Після відновлення отриманої реальної кривої спектральної інтенсивності зареєстрованого світлового потоку  $H(\omega_i)$  підключається підпрограма визначення усередненої базової кривої за розробленою трьох точковою методикою (розділ 3) та з урахуванням граничних відхилень.

$$\bar{H}(\omega_{i+1}) = \frac{H(\omega_i) + 2H(\omega_{i+1}) + H(\omega_{i+2})}{4} \quad (4.3)$$

де:  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Отримані значення спектральної базової інтенсивності слугують в якості рівня відліку при кожному  $\omega_i$  для визначення пікових відхилень інтенсивності  $H(\omega_i)$ . Якщо поточне значення інтенсивності  $H(\omega_i)$  зареєстрованого світлового потоку на частоті менше базового  $\bar{H}_{\text{баз}}(\omega_i)$  більш ніж на 10%, то така інтенсивність може вміщувати в собі інформацію про наявність в досліджуваній

суміші однієї з газових компоненти, яка саме на цій частоті поглинає світловий потік.

$$H(\omega_i) < 0,9 \cdot \bar{H}_6(\omega_i) \quad (4.4)$$

Програма визначає необхідні значення після чого розраховується фактична амплітуда відхилення

$$\Delta H(\omega_i) = H(\omega_i) - \bar{H}_6(\omega_i) \quad (4.5)$$

і за її величиною визначається вміст даного газового компоненту. Число таких пікових відхилень, як і допустиме число газових складових визначається лише шириною спектрального діапазону чутливості використовуваного лінійного перетворювача.

Після визначення та розрахунку концентрації газу, протокол дослідження може бути роздрукованим на принтері.

З метою підвищення точності реєстрації вмісту газових компонентів за рахунок введення коефіцієнтів вирівнювання нелінійності спектральної чутливості лінійного перетворювача їх значення можна визначити не з амплітудно – частотної характеристики конкретного типу ПЗЗ, а в результаті реального вимірювання.

Для цього перед початком контролю газової суміші проводиться тестове вимірювання спектральної інтенсивності, формуемого, оптичним аналізатором світлового потоку без наявності газової суміші в кюветі. Отримані значення зареєстрованої спектральної інтенсивності будуть враховувати усі фактори впливу на точність вимірювання: нелінійність спектральної чутливості ПЗЗ; тип та обсяг барвника; інтенсивність генерації лазера; тракт проходження світлового потоку.

Щоб виключити дію вказаних та неврахованих факторів, необхідно домножити значення отриманої кривої на коефіцієнти вирівнювання. Спершу необхідно на підставі отриманих вимірів визначити усереднене значення для даної системи значення інтенсивності:

$$\bar{H}(\omega_i) = \frac{\sum_{i=1}^{256} H(\omega_i)}{256} \quad (4.6)$$

по всім пікселям лінійного перетворювача.

На підставі отриманого усередненого значення  $\bar{H}(\omega_i)$  та поточних зареєстрованих значень  $H(\omega_i)$  визначаються коефіцієнти вирівнювання для кожної частоти  $\omega_i$ .

$$K(\omega_i) = \frac{\bar{H}(\omega_i)}{H(\omega_i)} \quad (4.7)$$

Ці коефіцієнти заносяться в пам'ять ПК для подальшого використання головною програмою. Дана методика визначення коефіцієнтів вимірювання враховує реальну дію негативних факторів і дозволяє підвищити точність вимірювання газових складових.

Використання даної методики та запропонованого пристрою реєстрації інтенсивності багатомодового світлового потоку дозволяє підвищити якість та оперативність оцінки вмісту газових складових в досліджуваній суміші.

## 5. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ ГАЗОПОДІБНИХ КОМПОНЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АТМОСФЕР АВТОМАТИЗОВАНОГО ЛАЗЕРНОГО ГАЗОАНАЛІЗАТОРА

Сучасні спектральні методи є ефективними засобами для аналізу різноманітних речовин. Суттєвою перевагою цих методів є те, що відповідні пристрої легко спрягаються з комп'ютерами, дозволяють реєструвати надзвичайно малі кількості речовин і накопичувати сигнали для статистичного аналізу. Використання ЕОМ не тільки прискорює отримання даних та підвищує їх надійність, але і створює нові методи дослідження. Не зважаючи на переваги ці методи застосовуються не досить критично, що може привести до суттєвих помилок в розрахунках.

Тому було запропоновано нову конструкцію газоаналізатора технологічних атмосфер в оптичному діапазоні – автоматизований лазерний комплекс на базі широкополосного лазера, в середину резонатора, якого поміщають газову суміш дослідного зразка.[2 ]

Теоретична чутливість метода ВРЛС по коефіцієнту поглинання в стаціонарному режимі генерації надзвичайно велика і по оцінкам [3] складає величину порядку  $10^{-12}\text{см}^{-1}$ . в конкретних експериментальних умовах мінімальний пороговий коефіцієнт чутливості  $K_{\text{пор}}$  можна визначити із співвідношення (5.1):

$$K_{\text{пор}} \cdot l_{\text{эф}} = 0.1 \quad (5.1)$$

де  $l_{\text{эф}} = \frac{c \cdot T \cdot l}{L}$  - ефективна довжина поглинаючого шару дослідного зразка,  $c$  – швидкість світла,  $T$  – тривалість генерації лазера в моді,  $l$  – довжина кювети з дослідним зразком в резонаторі,  $L$  – довжина резонатора.

Для імпульсів генерації, що мають тривалість більше  $10^{-3}$ с, а також для неперервного режиму генерації лазера на барвнику час генерації в окремих модах визначається флуктуаціями інтенсивності. Ці коливання виникають через нелінійність взаємодії мод багатомодового лазера в активному середовищі в каустиці резонатора.

При зменшенні інтенсивності генерації, тобто при роботі з невеликим перебільшенням накачки над порогом взаємодія мод зменшується, а характерна тривалість флуктуацій, відповідно збільшується. Для проведення кількісних вимірів методом ВРЛС є зміст вводити для неперервного лазера на барвнику модуляцію імпульсами, тривалість яких не перевищує характерної тривалості флуктуацій в окремих модах. В цьому випадку чутливість буде визначатися тривалістю імпульсів модуляції та перестане залежати від перевищення потужності накачки над порогом.

В даній роботі аналізується математична модель фізичних процесів взаємодії багатомодового лазерного випромінювача з дослідною речовиною. Застосування отриманих рівнянь дозволяє з високою точністю в автоматизованому режимі визначати концентрації потрібних домішок.[3]

Система рівнянь балансу для багатомодового лазера не стабільна до частотно-селективних втрат, які можуть мати місце через недоліки резонатора, а при спеціальному біселективному резонаторі – через наявність в резонаторі газоподібних компонент, що мають слабкі лінії поглинання в цій області. Слабка стійкість приводить до прояву частотної селекції в спектрі генерації.[3]

Вихідні рівняння балансу запишемо без врахування неоднорідності просторового вигорання активного середовища, міграції енергії збудження ті флуктуаційного характеру самовільного випромінювання. Рівняння мають вигляд:

$$\frac{dW(\omega, t)}{dt} = c \cdot \sigma \cdot W(\omega, t) \int_{-\infty}^{+\infty} N(\omega', t) \cdot g(\omega, \omega') d\omega' - \frac{W(\omega, t)}{T_{\phi}(\omega)} + \rho, \quad (5.2)$$

$$\frac{dN(\omega, t)}{dt} = P - c \cdot \sigma \cdot N(\omega, t) \int_{-\infty}^{+\infty} N(\omega', t) \cdot g(\omega, \omega') d\omega' - \frac{N(\omega, t)}{\tau}, \quad (5.3)$$

де  $W(\omega, t)$  і  $N(\omega, t)$  – спектральні розподілення щільності фотонів активних часток,  $g(\omega, \omega')$  – однорідний контур лінії підсилення,  $c$  – швидкість світла,  $\sigma$  – переріз індукованого випромінювання,  $T_{\phi}(\omega)$  – час життя фотона в резонаторі,  $\rho$  – середня потужність самовільного випромінювання в одиничному об'ємі в одиничній спектральній області,  $P$  – число активних часток, що створюються накачкою в одиничному спектральному інтервалі за одиницю часу,  $\tau$  – час самовільного розпаду активних часток.

При умові, що втрати випромінювання не залежать від частоти, тобто  $T_{\phi}(\omega) = T_0$ , стаціонарне вирішення системи (5.2) та (5.3) також не буде залежати від частоти:  $W(\omega, t) = W_0$ ,  $N(\omega, t) = N_0$ . Якщо тепер ввести слабкі, періодичні по частоті втрати (4.4)

$$\frac{1}{T(\omega)} = \frac{1}{T_0} - \Delta \left( \frac{1}{T} \right) \cdot \cos \left( \frac{2\pi\omega}{\Delta\omega} \right), \quad \Delta \left( \frac{1}{T} \right) \ll \frac{1}{T_0}, \quad (5.4)$$

а однорідний контур лінії підсилення вважати дисперсійним з шириною  $\gamma$  (5.5)

$$g(\omega, \omega') = \frac{(\gamma/2)^2}{(\omega - \omega')^2 + (\gamma/2)^2}, \quad (5.5)$$

то для стаціонарного вирішення можна в лінійному наближенні отримати вираз спектрального розподілення щільності фотонів  $W(\omega)$  (4.6):

$$W(\omega) = W_0 + \Delta\omega \cdot \cos\left(\frac{2\pi\omega}{\Delta\omega}\right), \quad (5.6)$$

$$\text{де: } \frac{\Delta W}{W_0} = \frac{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}{\frac{1}{T_0}} \cdot \left( \frac{\rho T_0}{W_0} + \frac{W_0}{\rho T_0} e^{-\frac{2\pi\gamma}{\Delta\omega}} \right)^{-1}. \quad (5.7)$$

Якщо період селекції малий в порівнянні з шириною однорідного контуру

$$\Delta\omega \ll 2\pi\gamma, \quad (5.8)$$

то другим членом в дужках можна знехтувати. Член  $\rho T_0/W_0$  представляє собою відношення середньої потужності спонтанного шуму до потужності генерації і тому дуже малий. Це призводить до того, що в спектрі генерації буде сильно проявлятися ( $\Delta W/W=1$ ) навіть дуже слабка селекція

$$\Delta\left(\frac{1}{T}\right) / \frac{1}{T_0} = \frac{\rho T_0}{W_0} = \frac{1}{M_0}, \quad (5.9)$$

де  $M_0$  – середнє число фотонів в одному типі коливань.

При спеціальному частотно-неселективному резонаторі з'являється можливість спостерігати спектр поглинання речовини, що заповнює резонатор, при умові, що його лінії поглинання суттєво однорідної ширини  $\gamma$  (що є еквівалентним умові (5.8)), але ширші за міжмодову відстань. Втрати, що вносяться речовиною визначаються рівнянням (5.10):

$$\Delta\left(\frac{1}{T}\right)_{(\omega)} = K(\omega) \cdot c \cdot \frac{1}{L}, \quad (5.10)$$

де  $K(\omega)$  – коефіцієнт поглинання дослідної речовини ( $\text{см}^{-1}$ ), а  $1/L$  співвідношення довжини частини резонатора, заповненої дослідною речовиною, та загальної довжини. Як правило це співвідношення наближається до одиниці, для того щоб його співмножником можна було знехтувати. З (5.9) та (5.10) видно, що в стаціонарному режимі повинно бути гарно видно лінії з

$$K_{\text{погл}}(\omega) \approx \frac{1}{c \cdot T_0 \cdot M_0}. \quad (5.11)$$

Для лазера на склі з  $\text{Nd}^{+3}$  це відповідає приблизно  $10^{-10} \text{ см}^{-1}$ .

В імпульсному режимі генерація розвивається наступним чином. За час приблизно рівний часу життя фотона в резонаторі  $T_0$  після вмикання накачки встановлюється плавне розподілення інтенсивності генерації по частоті  $I_0(\omega)$ , яка повторює різницю контурів підсилення і втрат. Час  $T_0 = 30 - 300 \text{ нс}$ , що значно менший від тривалості усього імпульсу. По закінченні цього проміжку часу інверсія заселеності скидається і коефіцієнт поглинання активного середовища

$$K_{\text{підс}}(\omega, t) = \sigma \int_{-\infty}^{+\infty} N(\omega', t) \cdot g(\omega, \omega') d\omega', \quad (5.12)$$

дорівнює з точністю до спонтанного шуму коефіцієнту втрат  $K(\omega) = 1/cT(\omega)$ , усередненому по однорідному контуру лінії підсилення.

Подальший розвиток спектральної інтенсивності можна описати рівнянням

$$\frac{dI(\omega, t)}{dt} = I(\omega, t) \cdot (K_{\text{підс}}(\omega, t) - K_{\text{втр}}(\omega, t)) \cdot c, \quad (5.13)$$

Це рівняння отримуємо з (5.2), якщо знехтувати спонтанним випромінюванням, яке проявляється лише при дуже великій тривалості неперервної генерації. Коефіцієнт втрат  $K_{\text{втр}}(\omega)$  зручно представити у вигляді

$$K_{\text{втр}}(\omega, t) = K_0 + K_{\text{погл}}(\omega), \quad (5.14)$$

де  $K_0$  описує втрати при відображеннях від дзеркал та інші втрати у резонаторі, при чому тут припускається, що резонатор безселективний, так як  $K_0$  не залежить від частоти. Поглинання дослідної речовини позначене за допомогою  $K_{\text{погл}}(\omega)$ . Оскільки коефіцієнт поглинання залежить від довжини хвилі, то за формулою (5.10) можна побудувати номограми залежності коефіцієнту поглинання  $K_{\text{погл}}(\omega)$  від концентрації молекул  $n$  в об'ємі газу для окремих складових компонент, тобто на окремих довжинах хвиль  $\omega$ . Сімейство номограм зображено на рисунку 5.1

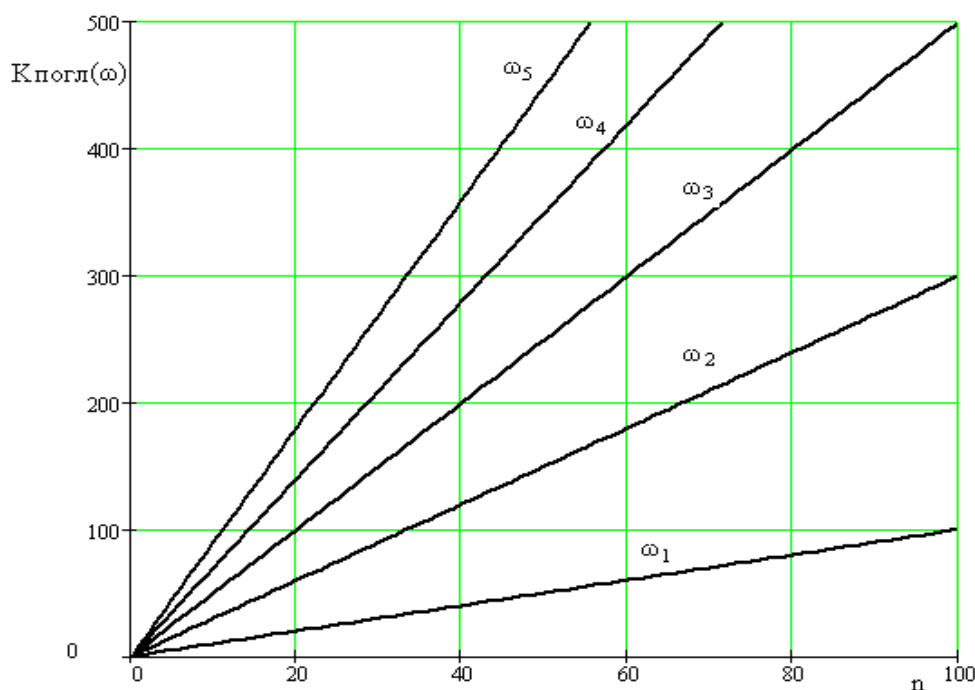


Рисунок 5.1 - Залежність коефіцієнту поглинання  $K_{\text{погл}}(\omega)$  від концентрації молекул  $n$  в об'ємі газу

Спектральну інтенсивність генерації можна представити у вигляді

$$I(\omega, t) = I_0(\omega, t) \cdot e^{-K_{\text{погл}}(\omega) \cdot c \cdot t}, \quad (5.15)$$

де під  $I_0(\omega, t)$  розуміємо розв'язок рівняння

$$\frac{dI_0(\omega, t)}{dt} = I_0(\omega, t) \cdot (K_{\text{підс}}(\omega, t) - K_0) \cdot c, \quad (5.16)$$

при початкових умовах  $dI_0(\omega, t)|_{t=0} = I_0(\omega)$ . Якщо  $K_{\text{погл}}(\omega)$  відповідає слабкій лінії поглинання, ширина якої значно менша за однорідну ширину лінії підсилення, то  $K_{\text{підс}}(\omega, t)$  не буде залежати від  $K_{\text{погл}}(\omega)$ . Таким чином під значенням  $I_0(\omega, t)$  можна розуміти спектральну інтенсивність генерації лазера при відсутності поглинаючої речовини у резонаторі. В цьому випадку спектральна інтенсивність є плавною функцією частоти і в основному повторює форму лінії підсилення. При введенні в резонатор поглинаючої речовини, на фоні цієї плавної функції з часом починають рости провали у відповідності з формулою (5.15), яка аналогічна закону Бугера-Ламберта-Бера, де роль оптичної товщини грає добуток  $c \cdot t$ .

Якщо під чутливістю метода до абсорбції розуміти, наприклад, спектральну лінію з таким коефіцієнтом поглинання, що до кінця імпульсу генерації з'явиться провал у спектрі на відповідній частоті глибиною  $I/I_0=1/e$ , то з (5.15) видно, що при неперервній генерації опромінення тривалістю  $T_{\text{опр}}$  чутливість буде

$$K = \frac{1}{(c \cdot T_{\text{опр}})}, \quad (5.17)$$

Мінімальний коефіцієнт поглинання, який ще можна зареєструвати, звичайно менший, він залежить від того, якої глибини провал реально вдасться виділити на фоні шумів фотоприймача.

Отже вираз (5.15) є основним для побудови алгоритму обчислення концентрації газоподібних речовин, так як  $K_{\text{погл}} = \sigma(\omega)$ , де  $\sigma(\omega)$  – переріз поглинання на даній частоті  $\omega$ . Для переважної більшості газоподібних та атомарних речовин ці спектральні характеристики  $\sigma(\omega)$  виміряні з високою точністю і наведені у відповідних довідниках.

Спосіб виміру коефіцієнта поглинання (концентрацій), заснований на залежності (5.15) полягає в наступному: генерація лазера з дослідним зразком в середині резонатора проходить одночасно по частоті і в часі (у двох взаємно перпендикулярних напрямках) та фіксується фотоприймачем. Змінною величиною є інтеграл спектральної інтенсивності по часу імпульсу генерації

$$H(\omega) = \int_0^{T_{\text{опр}}} I(\omega, t) dt, \quad (5.18)$$

Якщо припустити, що на протязі імпульсу  $I_0(\omega, t)$  не залежить від часу, тобто

$$I(\omega, t) \equiv I_0(\omega) \quad (5.19)$$

то  $H(\omega)$  можна представити наступним чином

$$H(\omega) = \int_0^{T_{\text{опр}}} I_0(\omega) \cdot e^{-K_{\text{погл}}(\omega) \cdot c \cdot t} dt = H_0(\omega) \frac{1 - e^{-K_{\text{погл}}(\omega) \cdot c \cdot T_{\text{опр}}}}{K_{\text{погл}}(\omega) \cdot c \cdot T_{\text{опр}}}, \quad (5.20)$$

де  $H_0(\omega)$  представляє собою інтеграл

$$H_0(\omega) = \int_0^{T_{\text{опр}}} I_0(\omega, t) dt, \quad (5.21)$$

На основі рівняння (5.21) можна побудувати графіки залежності інтеграла спектральної інтенсивності випромінювання  $H(\omega)$  від коефіцієнта поглинання речовини  $K_{\text{погл}}(\omega)$  для окремих газових компонент. Сімейство характеристик зображено на рисунку 5.2.

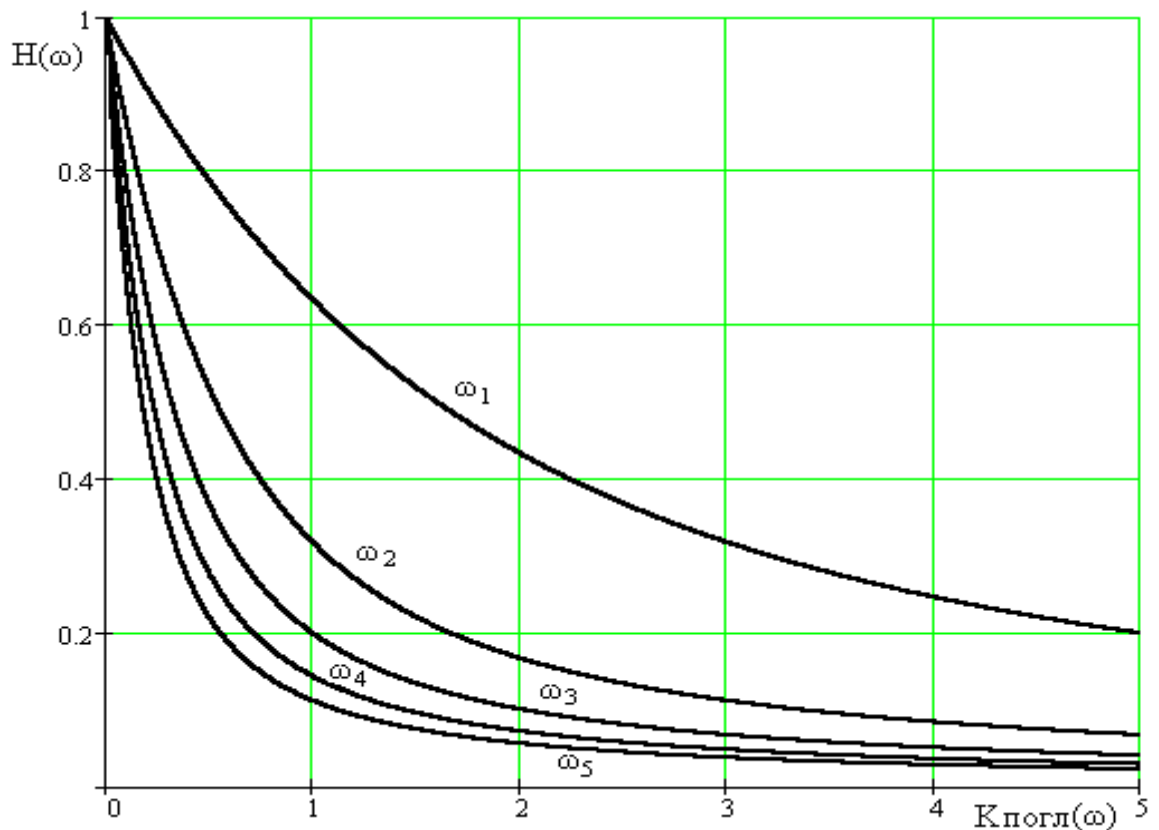


Рисунок 5.2 - Залежність інтеграла спектральної інтенсивності випромінювання  $H(\omega)$  від коефіцієнта поглинання речовини  $K_{\text{погл}}(\omega)$

Неважко обчислити функцію  $x=f^{-1}(y)$ , зворотну до функції

$$y = f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{x}, \quad (5.22)$$

і визначити  $K_{\text{погл}}(\omega)$  за формулою

$$K_{\text{погл}}(\omega) = \frac{1}{c \cdot T_{\text{опр}}} \cdot f^{-1} \left( \frac{H(\omega)}{H_0(\omega)} \right), \quad (5.23)$$

Таким чином можна вирахувати коефіцієнти поглинання і без часової розгортки спектра генерації, багатомодового лазера, маючи лінійну систему реєстрації, що інтегрує світло на протязі вимірювання. Задача визначення концентрації у дослідному зразку конкретних складових зводиться до того щоб по відомій інтенсивності світлового потоку на конкретній довжині хвилі визначити коефіцієнт поглинання цієї хвилі у дослідному зразку.

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі досліджено методи та засоби реєстрації газових складових досліджуваної суміші за допомогою оптичного газоаналізатора працюючого за методом внутрішньорезонансної лазерної спектроскопії.

Проаналізовано можливість використання пристроїв з зарядовим зв'язком замість фотопластин та визначено типи ПЗЗ здатні працювати в ближньому інфрачервоному діапазоні.

Теоретично досліджено і розроблено методики усереднення, вирівнювання та визначення базової спектральної інтенсивності.

З метою вдосконалення існуючого оптичного газоаналізатора розроблено блок реєстрації спектральної інтенсивності світлового потоку на базі лінійного перетворювача G9208 який реєструє газові складові в ближньому інфрачервоному діапазоні від 0,9мкм до 2,55мкм, формування та передача цифрових даних до ПК через USB – порт. Розроблено алгоритми роботи головної програми мікроконтролера та головної програми в ПК.

Розглянуті заходи з охорони праці.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аналітичні екологічні прилади та системи. – Монографія./ Під заг. ред. Порева В.А. - Вінниця: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2009. — 336 с
2. Невідомий С. И., Нікулін О. Ю. Прилади з зарядовим зв'язком — основа сучасної телевізійної техніки. Основні характеристики ПЗЗ // «Спеціальна техніка», № 5, 1999.
3. Невідомий С. И., Нікулін О. Ю. Прилади з зарядовим зв'язком. Пристрій і основні принципи роботи // «Спеціальна техніка», № 4, 1999.
4. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 319 с.
5. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.Г. Теорія технічних систем. - К.: Тернопіль, 1998.-310с.
6. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування. - К.:Вища школа,1995.-231 с.
7. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій.- К.:Вища школа,1995.-519 с.
8. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
9. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
10. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П.,Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
11. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
12. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
13. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.

14. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
15. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
16. Конституція України. Київ : Вид-во Паливода А. В., 2019. 76 с.
17. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 02.11.2024).
18. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 02.11.2024).
19. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 02.11.2024).
20. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 05.11.2024).
21. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 11.11.2024).
22. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 09.11.2024).
23. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 19.10.2024).
24. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Від 25.07.2006. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення: 04.11.2024).
25. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
26. Вікіпедія. Вільна енциклопедія : веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення: 31.09.2024).

27. <http://www.oceanoptics.com/technical/detectorhahamatsuG9208.pdf>.
28. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7676.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7676.pdf).
29. [http://www.sparkfun.com/datasheets/IC/FT232R\\_v104.pdf](http://www.sparkfun.com/datasheets/IC/FT232R_v104.pdf).

