



**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут *інформаційних технологій*

Кафедра *інформаційно-вимірювальних технологій*

Освітній рівень *другий (магістерський)*

Спеціальність *175- Інформаційно-вимірювальні технології*

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІВТ

О.Є. Середюк

«      »                      2024 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

*Бабецький Руслан Ігорович*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розробка пристрою для контролю концентрації фреону*

керівник роботи *Лютак Зіновій Петрович., к.т.н., проф.*

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від "03" грудня 2024 року №787/7

2. Строк подання студентом роботи 16.12.2024

3. Вихідні дані до роботи концентрація фреону у замкненому об'ємі 0-1000 мг/м<sup>3</sup>, довжина хвилі 3-20мкм, температура навколишнього середовища від -2 °С до 40°С.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

*1. Огляд існуючих методів і засобів для вимірювання вмісту фреону*

*2. Розробка оптичної схеми газоаналізатора фреонів*

*3. Проектування та розрахунок основних вузлів газоаналізатора*

*4. Метрологічні дослідження розробленого пристрою*

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

*1. Модель інфрачервоного випромінювача*

*2. Конструкція випромінювача інфрачервоного спектру*

*3. Розрахунок втрат в оптичній системі газоаналізатора*

*4. Функціональна схема газоаналізатора*

*5. Циклограма роботи електромагнітних клапанів*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>нормоконтроль</i>	<i>проф. Лютак З.П.</i>		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд існуючих методів і засобів для вимірювання вмісту фреону</i>	<i>18.11.24-24.11.24</i>	
2.	<i>Розробка оптичної схеми газоаналізатора фреонів</i>	<i>25.11.24-02.12.24</i>	
3.	<i>Проектування та розрахунок основних вузлів газоаналізатора</i>	<i>03.12.24-09.12.24</i>	
4.	<i>Метрологічні дослідження розробленого пристрою</i>	<i>10.12.24-14.12.24</i>	
5.	<i>Оформлення магістерської роботи</i>	<i>14.12.24-16.12.24</i>	

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис )

*Бабецький Р.І.*  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

*Лютак З.П.*  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 63 с., 10 рис., 31 джерела, 5 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – контроль вмісту фреонів у замкнених об'єктах.

Мета досліджень є розробка автоматичного оптико-електронного газоаналізатора з високою чутливістю, широким діапазоном вимірювання та стійким до впливу зовнішніх факторів і невимірюваних компонентів на показання газоаналізатора.

Методи дослідження. Під час розробки газоаналізатора застосовувалися принципи теорії побудови оптико-електронних приладів. Дослідження та експерименти, що проводяться в рамках даної роботи, здійснювалися за допомогою засобів комп'ютерного моделювання та пакетів програм Microsoft Excel, SolidWorks, Micro Cap.

У магістерській роботі розглянуто проблему вимірювання вмісту фреону в повітрі за допомогою різних методів і засобів газоаналізу. В роботі виконано огляд існуючих методів, зокрема, електрохімічних, напівпровідникових та оптичних газоаналізаторів, та проведено аналіз їхніх переваг і недоліків. Особлива увага приділена розробці оптичної схеми газоаналізатора фреонів, що базується на інфрачервоній технології. Оцінено вплив компонентів атмосферного повітря на точність вимірювання та створено модель інфрачервоного випромінювача, розроблено його конструктивні особливості та вибрано приймач оптичного випромінювання. У роботі також здійснено проектування та розрахунок основних вузлів газоаналізатора, включаючи функціональну схему пристрою та математичне моделювання електронного підсилювача. Розглянуто вибір і розрахунок електричної схеми блоку живлення газоаналізатора. Для забезпечення метрологічної точності проведено дослідження основних похибок пристрою та впливу підвищеної температури середовища на його роботу.

## **ABSTRACT**

Master's thesis: 63 p., 10 fig., 31 sources, 5 sheets of drawings.

The object of the study is the control of the content of freon in closed volumes.

The purpose of the research is to develop an automatic opto-electronic gas analyzer with high sensitivity, a wide measurement range and resistant to the influence of external factors and unmeasured components on the readings of the gas analyzer.

Research methods. During the development of the gas analyzer, the principles of the theory of the construction of opto-electronic devices were applied. Research and experiments conducted within the framework of this work were carried out using computer modeling tools and Microsoft Excel, SolidWorks, Micro Cap software packages.

The master's thesis considers the problem of measuring the content of freon in the air using various methods and means of gas analysis. The work reviews existing methods, in particular, electrochemical, semiconductor and optical gas analyzers, and analyzes their advantages and disadvantages. Special attention is paid to the development of the optical circuit of the freon gas analyzer based on infrared technology. The influence of atmospheric air components on the measurement accuracy was assessed and a model of the infrared emitter was created, its design features were developed and an optical radiation receiver was selected. The work also included the design and calculation of the main components of the gas analyzer, including the functional diagram of the device and mathematical modeling of the electronic amplifier. The selection and calculation of the electrical circuit of the gas analyzer power supply unit were considered. To ensure metrological accuracy, a study of the main errors of the device and the influence of elevated ambient temperature on its operation was conducted.

## Зміст

Вступ.....	6
1 Огляд існуючих методів і засобів для вимірювання вмісту фреону.....	9
1.1 Аналіз об'єкту дослідження.....	9
1.2 Електрохімічні газоаналізатори.....	11
1.3 Напівпровідникові газоаналізатори.....	13
1.4 Оптичні газоаналізатори.....	14
1.5 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу.....	16
2 Розробка оптичної схеми газоаналізатора фреонів.....	18
2.1 Аналіз впливу компонентів атмосферного повітря на вимірювання...	18
2.2 Модель інфрачервоного випромінювача.....	24
2.2.1 Випромінювальна здатність напівпрозорих тіл.....	24
2.2.2 Дослідження оптичних властивостей матеріалів.....	27
2.2.3 Розробка конструктивних особливостей інфрачервоного випромінювача.....	31
2.3 Вибір приймача оптичного випромінювання.....	32
2.4 Розрахунок втрат в оптичній системі газоаналізатора.....	35
3 Проектування та розрахунок основних вузлів газоаналізатора.....	39
3.1 Розробка функціональної схеми газоаналізатора.....	39
3.2 Математичне моделювання електронного підсилювача газоаналізатора.....	45
3.3 Вибір та розрахунок електричної схеми блоку живлення газоаналізатора.....	49
4 Метрологічні дослідження розробленого пристрою.....	55
4.1 Методика проведення метрологічних досліджень.....	55
4.2 Визначення основної похибки, що допускається.....	57
4.3 Випробування впливу підвищеної температури середовища.....	58
Висновки.....	60
Список використаних джерел.....	61

## Вступ

Терміном фреони позначають групу, що поєднує газоподібні речовини та низькокиплячі рідини, безбарвні, зі слабким запахом, добре розчиняються в органічних розчинниках, а також у багатьох мастилах і практично нерозчинні у воді та полярних розчинниках.

Переважає більшість фреонів малотоксична, що й зумовлена їх повсюдна поширеність [1]. Потрапляючи в організм, вони не метаболізуються з утворенням отруйних проміжних продуктів, а виводяться у незміненому вигляді.

Токсичність мають продукти горіння холодоагентів при нагріванні їх понад 250–400 °С. До таких відносяться, наприклад, продукти горіння фреону-22 – тетрафторетилен, судинна отрута, що володіє нейро- та нефротоксичною дією, і фосген – потужна отруйна речовина, що викликає набряк легень.

Доведено, що, накопичуючись в атмосфері, фреони здатні руйнувати молекули озону [2], контактуючи з ними і тим самим ушкоджувати озоновий шар атмосфери. Віденською конвенцією 1985, Монреальським протоколом 1987 із захисту озонового шару та Конференцією з клімату в Парижі 2015 р. були обмежені виробництва деяких хлорфторвуглеців.

У зв'язку з вищесказаним, контроль вмісту фреонів має важливе значення [3, 4]. Застосування фреонів у промисловості [5] має два яскраво виражені напрямки, що вимагають контролю відповідних гранично допустимих концентрацій:

1) контроль концентрації фреонів у замкнутих об'ємах, де можливе тривале знаходження людей. Контроль житлової зони. Необхідний діапазон виміру від 0 до 500 мг/м<sup>3</sup>;

2) контроль концентрації фреонів у замкнутих об'ємах, де можливе перебування людей протягом робочого часу (склади зберігання фреонів, виробництва фреонів, приміщення де, встановлені ємності з фреоном, приміщення, де встановлені потужні холодильні установки). Контроль ГДК робочої зони [5]. Необхідний діапазон виміру від 100 до 1000 мг/м<sup>3</sup>.

Для контролю вмісту фреонів в даний час використовуються електронміліметричні, напівпровідникові та оптико-абсорбційні газоаналізатори [6]. Електрохімічні газоаналізатори мають високу похибку. Іншим недоліком є їхня непрацездатність в умовах малої вологості.

Газоаналізатори на напівпровідникових датчиках призначені для вимірювання фреонів у великих концентраціях, наприклад, у місцях їх зберігання, що не дозволяє використовувати цей принцип вимірювання для вирішення задачі контролю низьких концентрацій.

Найбільш точні газоаналізатори мають великі габарити характеристики та високу ціну, а малогабаритні газоаналізатори, з відносно невисокою ціною, мають низьку селективність і точність.

**Метою роботи** є розробка автоматичного оптико-електронного газоаналізатора з високою чутливістю, широким діапазоном вимірювання та стійким до впливу зовнішніх факторів і невимірюваних компонентів на показання газоаналізатора.

**Об'єктом досліджень** є контролю вмісту фреонів у замкнутих об'ємах.

**Предметом досліджень** є формування концентрацій фреонів у замкнутих об'ємах.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити **наступні завдання**:

- розробити модель інфрачервоного випромінювача із заданим максимумом спектральної щільності енергетичної світності;
- розробити та дослідити метод модуляції щільності оптичного середовища зміною тиску в робочій камері оптико-електронного газоаналізатора.

### **Наукова новизна**

1. Модель інфрачервоного випромінювача, яка відрізняється урахуванням спектру поглинання матеріалу, що дозволяє забезпечити підвищення селективності та збільшення чутливості оптико-електронного газоаналізатора.

2. Метод модуляції щільності оптичного середовища зміною тиску в робочій камері, що дозволяє мінімізувати залежність показань газоаналізатора від зовнішніх факторів, що впливають.

**Практична значущість роботи.** Змодельовано та досліджено інфрачервоний випромінювач зі спектральною щільністю енергетичної світності в діапазоні довжин хвиль від 7 до 10 мкм.

Розроблено газоаналізатор, має високу стійкість до зовнішніх факторів, що впливають, і дозволяє контролювати концентрацію двох фреонів одночасно.

**Методи що використовувалися для проведення дослідження** Під час розробки газоаналізатора застосовувалися принципи теорії побудови оптико-електронних приладів. Дослідження та експерименти, що проводяться в рамках даної роботи, здійснювалися за допомогою засобів комп'ютерного моделювання та пакетів програм Microsoft Excel, SolidWorks, Micro Cap.

# 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВМІСТУ ФРЕОНУ

## 1.1 Аналіз об'єкту дослідження

Назва "фреон" - це технічний термін, яким позначають усі холодоагенти. Розробником та першим виробником речовин цієї групи є компанія «DuPont» — одна з найбільших хімічних компаній у світі. За своїм походженням і складом це фторвмісні похідні вуглеводнів, органічні сполуки або галогеноалкани (алкілгалогеніди). Нині світова промисловість випускає понад 40 найменувань фреонів. Речовини цієї групи застосовуються як холодоагенти, а також палива, спінювачі, розчинники, полум'ягасники [1].

Робоча речовина холодильної машини - фреон змінює свій агрегатний стан у різних частинах холодильного контуру.

Як перший холодоагент використовувалася вода, оскільки з 1755 р. вона служила «для отримання фрігорій (негативних калорій)» у лабораторній установці, яку створив William Gullen.

Пізніше в 1834 р. американець Jacob Perkins виготовив компресійну машину, яка працювала на діетиловому ефірі, а в 1844 р. теж американець John Gorrie - машину зі стиском і розширенням повітря. У 1859 р. француз Ferdinand Carre спорудив абсорбційну холодильну машину на аміаку, а через чотири роки Charles запустив компресор, що працює на метиловому ефірі. До кінця XIX ст. використовувалися ще два нових холодоагенти: вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) та двоокис сірки ( $\text{SO}_2$ ) [1].

Основні вимоги до холодоагентів у цей час: відсутність шкідливого впливу на навколишнє середовище; пожежонебезпечність та нетоксичність; низька температура кипіння при атмосферному тиску; невисокі тиски конденсації; високі питомі показники переходу рідина – газ; невисокий питомий об'єм у газоподібній фазі; помірні температури в режимі стиснення в компресорі для того, щоб уникнути згоряння мастила; низькі показники питомої теплоємності у

рідкій фазі; помірні закупівельні ціни та достатній обсяг виробництва (бути доступними).

До підписання Монреальського протоколу характеристики холодоагентів описувалися невеликою кількістю властивостей. З тих пір до них додалися характеристики щодо впливу на навколишнє середовище, які висунулися на перший план.

Для позначення холодоагентів використовують як загальні назви, що застосовуються в органічній хімії, і спеціальні. Відповідно до міжнародного стандарту ISO-817 «Органічні холодоагенти, допускається кілька позначень: умовна, торговельна, хімічна та хімічна формула [1,2].

Умовне позначення холодоагентів є кращим і складається з літери «R» (Refrigerant) та числа. Цифри пов'язані зі структурою молекули холодоагента і розшифровуються в такий спосіб. Остання цифра дорівнює числу атомів фтору в молекулі, передостання - числу атомів водню плюс одиниця, третя справа - число атомів вуглецю мінус одиниця. Для похідних метану вона дорівнює нулю та її прийнято опускати. Похідні метану ( $\text{CH}_4$ ) позначаються за допомогою двозначних чисел (наприклад, R-12 –  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , R-22 –  $\text{CHClF}_2$ ), похідні етану, пропану, бутану – за допомогою тризначних (R-143- $\text{C}_2\text{H}_3\text{F}_3$ ). У тих які містять бром до числового позначення додають букву і цифру, рівну числу атомів бромову в молекулі. Наприклад, R-13B1 –  $\text{CF}_3\text{Br}$ . Починаючи з галогенопохідних етану, з'являються ізомери. Симетричний ізомер зображується лише комбінацією цифр. У міру зростання асиметрії до цифрової комбінації відповідного ізомеру додають букву «а», при більшій асиметрії її замінюють буквою «в». Наприклад, R-134-( $\text{CHF}_2\text{-CHF}_2$ ) R-134a-( $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ ) [2].

Холодагенти неорганічного походження мають номери, що відповідають їх молекулярній масі плюс 700. Наприклад, аміак ( $\text{NH}_3$ ) позначають як R-717, воду ( $\text{H}_2\text{O}$ ) - як R-718, двоокис вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) – як R-744 [2].

Холодагентам органічного походження присвоєно серію 600, наприклад, ізобутан R-600a, а номер кожного холодоагенту всередині цієї серії позначають довільно.

Азеотропні суміші, тобто. суміші, які киплять і конденсуються при постійній температурі як однорідні речовини, мають серію 500 з нумерацією в ній, наприклад, R-502 [2].

Зеотропним або неазеотропним сумішам, у яких температури кипіння та конденсації змінюються в умовах постійного тиску, присвоєно серію R-400 з довільним номером для кожного холодоагенту всередині неї, наприклад, R-401A. У розшифровці цього умовного позначення вказуються види холодоагентів, що входять до суміші, та їх процентний вміст у суміші, наприклад, R-401A-R-22/ R-152A/R-124 (53/13/34%). Холодагенти в позначенні розташовуються у порядку підвищення нормальних температур кипіння.

Останнім часом все частіше букву R замінюють аббревіатурою групи, що вказує на ступінь її впливу на озоновий шар: ХФВ (CFC) - хлорфторвуглеці, холодагенти, що мають високий потенціал руйнування озонового шару атмосфери: ГХФВ (HCFC) - гідрохлорфторвуглеці, холодагенти що мають низький вплив на озоновий шар атмосфери ДФВ (HFC) – гідрофторвуглеці, озонобезпечні холодагенти.

Крім того, кожен виробник холодоагентів випускає у продаж свою продукцію під власною назвою [2,3].

## **1.2 Електрохімічні газоаналізатори**

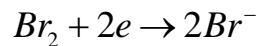
Принцип дії даних газоаналізаторів ґрунтується на вимірі опору (електропровідності), напруги або струму, що характеризують проходження електричного струму в розчинах електrolітів при їх взаємодії з аналізованим газом [4].

На даному принципі побудовано газоаналізатор HLD-100. Повне розкладання фреону 114B2 (фреону 13B1) відбувається у печі при температурі 930 (940) °С. Одним із продуктів розкладання є бром, кількість якого пропорційна концентрації фреону в повітрі і визначається гальванічним перетворювачем, що складається з платинового катода та срібного анода,

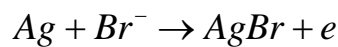
розділених сепараційною прокладкою, просоченою 40 % розчином хлористого літію.

Дія газоаналізатора ґрунтується на електрохімічному визначенні вільних галогенів, виявлених при термічному розкладанні фреону 114В2 (або 13В1) у термохімічному перетворенні фреону 22 (або 12) [4,5].

Бром, що міститься в газовій суміші, при контакті з поверхнею катода іонізується за реакцією:



При цьому відбувається реакція:



У результаті чого у зовнішньому колі виникає струм, пропорційний вмісту броду. Гальванічна комірка здійснює практично стовідсоткове перетворення струму.

Фреон 22 у печі розкладання при температурі 930 °С розкладається до з'єднання НСІ, яке перетворюється в реакційній печі з наповнювачем з КВrО<sub>3</sub> у вільні галогени. Кількість галогенів, що утворилися, пропорційне вмісту фреону у повітрі. Визначення галогенів здійснюється вищеописаною коміркою.

Фреон 12 у печі розкладання при температурі 1050 °С розкладається до з'єднання НСІ, яке перетворюється у печі на вільні галогени. галогени, що утворюються, визначаються тієюж коміркою [5].

Печі з розкладання фреонів розташовані до і після реакційної печі по ходу газового потоку. Піч розкладання, розташована після реакційної печі, працює в одному з двох режимів: у режимі розкладання фреону 114В2 (при температурі 930 °С) або в режимі розкладання фреону 13В1 (при температурі 940 °С).

Піч розкладання, розташована до реакційної печі, також працює в одному з двох режимів: в режимі розкладання фреонів 22 і 114В2 (при температурі 930 °С), або в режимі розкладання фреонів 12 і 114В2 (при температурі 1050 °С) або в режимі розкладання фреонів 22 та 13В1 (при температурі 940 °С) або в режимі розкладання фреонів 12 і 13В1 (при температурі 1050 °С).

Печі розкладання включаються з появою будь-якого фреону періодично поперемінно з періодом не більше 5 хв. При роботі печі розкладання, що знаходиться до реакційної печі, відбувається повне розкладання фреону 114B2 (або фреону 13B1) до брому і розкладання фреону 22 (або фреону 12) до HCl з подальшим перетворенням у реакційній печі до галогенів. Відповідно, вимірювальною коміркою визначається сумарний вміст галогенів, для двох фреонів [5].

При роботі печі розкладання, що знаходиться після реакційної печі, відбувається повне розкладання до галогену фреону 114B2 (або фреону 13B1). Відповідно, коміркою визначається лише вміст фреону 114B2 або фреону 13B1.

Електрохімічний метод має низку недоліків:

- мінімальний ресурс сенсора;
- втрата працездатності при зниженні вологості менше 45%;
- низька швидкодія;
- низька надійність високотемпературної печі.

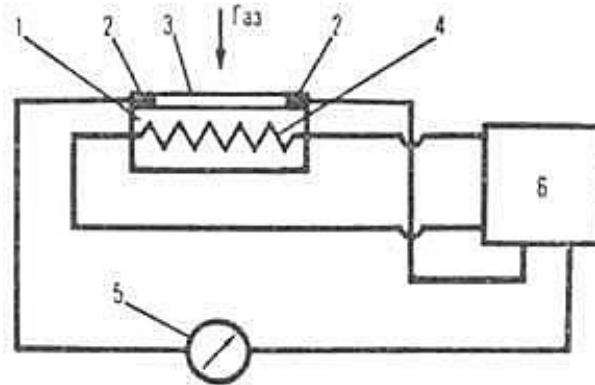
### **1.3 Напівпровідникові газоаналізатори**

Принцип дії даних газоаналізаторів ґрунтується на зміні поверхневого опору напівпровідника (плівки або монокристала) при дії (адсорбції) аналізованого компонента суміші. В основі роботи напівпровідникових газоаналізаторів лежить зміна провідності чутливого шару при хемосорбції на його поверхні молекул хімічно активних газів [6, 7] (рисунок 1.1 - загальна функціональна схема напівпровідникового газоаналізатора).

Селективність аналізу досягається варіюванням складу чутливого шару та його температури (за допомогою вбудованого нагрівача) [6].

У напівпровідникових газоаналізаторах з кристалічними чутливими елементами вимірюють провідність монокристала або складнішої напівпровідникової структури з р-п- переходами при зміні зарядового стану поверхні, тобто концентрації або розподілу зарядів на ній [7].

Робота газоаналізатора здійснюється так: повітря з навколишнього середовища за рахунок дифузії потрапляє крізь металеву сітку на датчик. Реєстрований газ викликає окислення нагрітого чутливого елемента (оксид металу) і тим самим викликає зміну провідності залежно від концентрації фреону. Такий нелінійний процес зміни провідності оцінюється вбудованою в датчик електронікою і за допомогою мікропроцесора приводиться до лінійного вигляду.



1 - підкладка, 2 - контакти, 3 - чутливий шар, 4 - нагрівальний елемент, 5 - вторинний прилад, 6 - джерело напруги

Рисунок 1.1 – Загальна функціональна схема напівпровідникового газоаналізатора [6]

Газоаналізатори на основі напівпровідникових сенсорів мають низку недоліків, а саме:

- малий ресурс сенсора;
- відсутність селективності;
- висока похибка вимірювання.

#### 1.4 Оптичні газоаналізатори

Принцип дії оптичних газоаналізаторів [7] ґрунтується на зміні оптичних властивостей аналізованих газових сумішей при зміні концентрації цільових речовин. В основу роботи оптичних газоаналізаторів покладено наступні

оптичні властивості: показник заломлення, оптична густина, спектральне поглинання газової суміші [8].

Автоматичні оптичні газоаналізатори [8, 9] поділяються на групи, в залежності від того, на якому принципі роботи ґрунтується прилад:

1) абсорбційні – в основі лежить принцип поглинання променистої енергії в інфрачервоній області спектру (оптико-акустичні), ультрафіолетовій, видимих областях спектру (фотоколориметричні, рідинні та стрічкові);

2) інтерферометричні – в основу роботи закладено явище усунення інтерференційних смуг внаслідок зміни оптичної густини газового середовища на шляху одного з двох когерентних променів;

3) емісійні – основою покладено принцип випромінювання променистої енергії, наприклад, вимірювання інтенсивності спектральних ліній випромінювання компонента залежно від концентрації в аналізованій газовій суміші. Цей метод зазвичай називається методом емісійного спектрального аналізу газової суміші, цей метод аналізу було запропоновано С. Ефрішем.

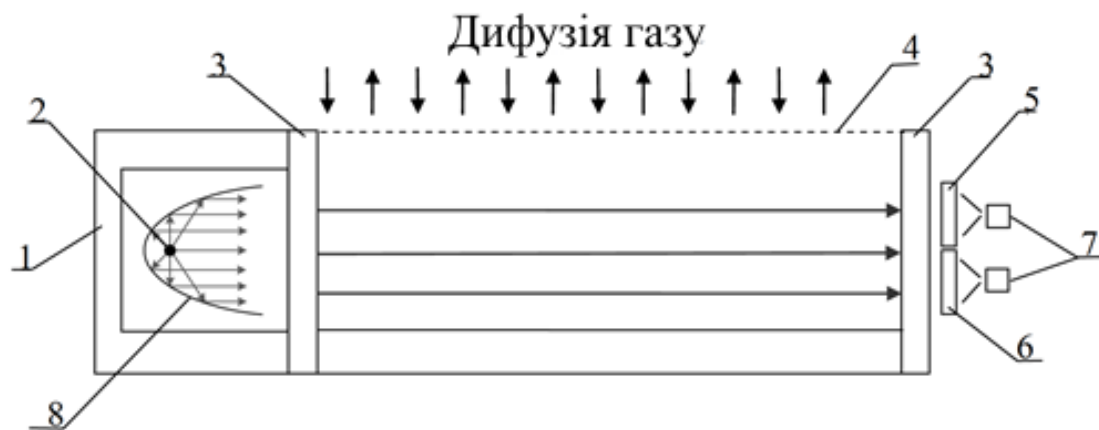
Для визначення концентрації метану, окису вуглецю, двоокису вуглецю [10] у складних газових сумішах у різних промислових галузях, застосовують газоаналізатори, принцип роботи яких ґрунтується на поглинанні ІЧ-випромінювання. Таке широке застосування можна пояснити тим фактом, що в ІЧ-області спектру аналізовані гази мають інтенсивні які відрізняються одна від одної по положенню в спектрі смугами поглинання.

Для визначення з високою точністю вмісту парів хлору, ртуті, інших токсичних або вибухонебезпечних парів та газів у технологічних газових сумішах та в повітряному середовищі хімічної, нафтової та харчової промисловості застосовують газоаналізатори, в основу роботи яких покладено принцип поглинання ультрафіолетових променів [11].

З метою визначення в повітряному середовищі робочих зон небезпечних концентрацій токсичних газів та пари застосовуються фотоколориметричні газоаналізатори, в основі роботи яких знаходиться принцип поглинання променів у видимій області спектрів. У стрічкових газоаналізаторах застосовують просочену або змочену реактивом паперову або текстильну

стрічку, світлопоглинання поверхні якої і вимірюється. Фотоколориметричні газоаналізатори призначені для вимірювання мікроконцентрацій газів у складних газових сумішах та повітряному середовищі. Також зазначимо, що для визначення великих концентрацій газів даний тип газоаналізатора непридатний [11].

Робота датчика такого газоаналізатора заснована на селективному оптичному поглинанні оптичного випромінювання молекулами R22 в ІЧ-області оптичного спектру.



1 – випромінювач, 2 – джерело випромінювання, 3 – захисне скло, 4 – газопроникна мембрана, 5 – інтерференційний фільтр робочого каналу, 6 – інтерференційний фільтр опорного каналу, 7 – фотоприймачі, 8 – дзеркальний параболічний об'єктив

Рисунок 1.3 – Схема чутливого елемента оптичного газоаналізатора [11]

Датчик працює на двох довжинах хвиль, що виділяються світлофільтрами [12]. Одна з них робоча, інша довжина хвилі, на якій немає поглинання світла молекулами фреону R22, опорна. Вимірювання виконуються в кюветі, куди надходить навколишнє повітря за допомогою дифузії.

### 1.5 Висновки та постановка завдання на магістерську роботу

В огляді наведено методи вимірювання концентрації фреонів, які використовуються в серійних газоаналізаторах.

Аналізатор, що використовує електрохімічні датчики, має низьку селективність і потребує періодичного коригування показань у міру витрати ресурсу електрохімічного перетворювача. Крім того, електрохімічний осередок втрачає працездатність при вологості менше 45%.

Аналізатори на напівпровідникових сенсорах мають високу похибку вимірювання, низький ресурс сенсора, даний тип не придатний для вимірювання малих концентрацій фреонів і застосовується в основному для вимірювання великих концентрацій фреонів, а також як течешукачі фреонів.

Аналізатор, що ґрунтується на методі оптичної абсорбційної спектроскопії, має низьку селективність і не здатний вимірювати малі концентрації фреону.

З вище сказаного можна зробити висновок про необхідність створення оптико-електронного газоаналізатора, який має високу швидкодію, селективність і відносно невисоку вартість, з великим ресурсом роботи, який був би затребуваний на ринку.

Перераховані недоліки аналізатора для вимірювання концентрації фреону, що ґрунтується на методі оптичної абсорбційної спектроскопії, обумовлені тим, що вимірювання поглинання фреону проводиться в далекій ІЧ-області спектру фреону, що перевищує існуючий по селективності та чутливості.

Ця ідея була взята за основу для подальших досліджень, виконаних у даній роботі.

## 2 РОЗРОБКА ОПТИЧНОЇ СХЕМИ ГАЗОАНАЛІЗАТОРА ФРЕОНІВ

### 2.1 Аналіз впливу компонентів атмосферного повітря на вимірювання

Принцип роботи оптико-абсорбційного газоаналізатора ґрунтується на поглинанні ІЧ-випромінювання від 2 до 20 мкм молекулами вимірюваної речовини на характерній довжині хвилі.

Характеристичні довжини хвиль з'являються у спектрі за наявності в молекулі речовини певних хімічних груп [12, 13]. До них відносяться, наприклад, валентні коливання зв'язків С–Н, С=О, С=C, О–Н, деформаційні коливання С–Н, N–О, коливання груп – NO<sub>2</sub>, COO, CONH<sub>2</sub>. Фреони мають у складі молекули характерний зв'язок С-Ф, і згідно з [14, 15], потужні та різкі смуги поглинання похідних галогенів знаходяться в діапазоні від 7,5 до 9,5 мкм [16]. На рисунку 2.1 наведено спектри поглинання фреонів, що застосовуються у промисловості.

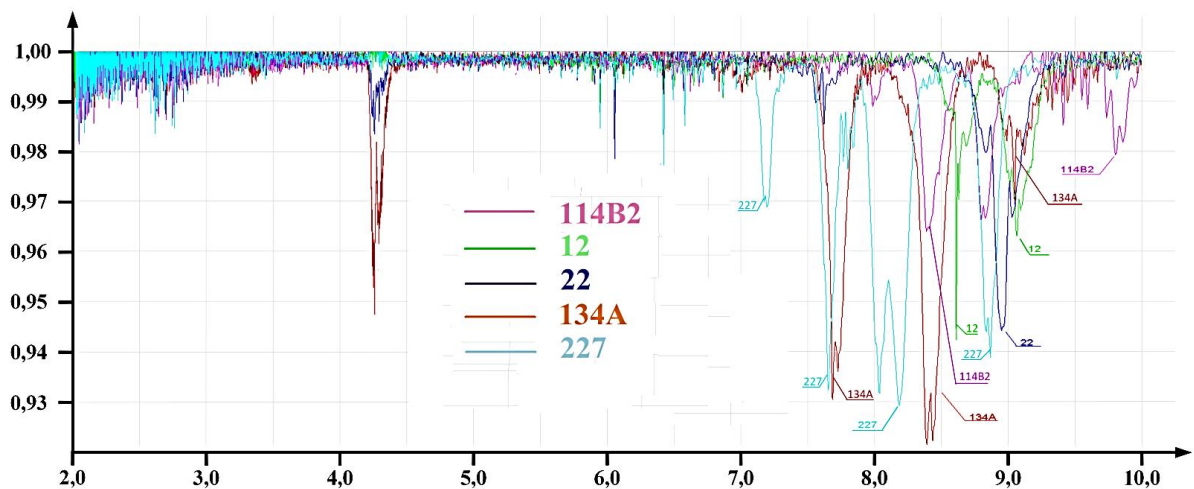


Рисунок 2.1 – Спектр поглинання фреонів у діапазоні від 3 до 10 мкм [16].

При вимірюванні складу атмосферного повітря основними нецільовими компонентами, що впливають на точність вимірювання газоаналізатора, є атмосферна волога та вуглекислий газ CO<sub>2</sub> [17] (спектр пропускання атмосферних газів представлений на рисунку 2.2). Середнє значення концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері становить 0,04% (приблизно 730 мг/м<sup>3</sup>). У

замкнених, непривітрованих приміщеннях концентрація  $\text{CO}_2$  може досягати  $9000 \text{ мг/м}^3$ . На рисунку 2.2 вікна прозорості позначені синім кольором.

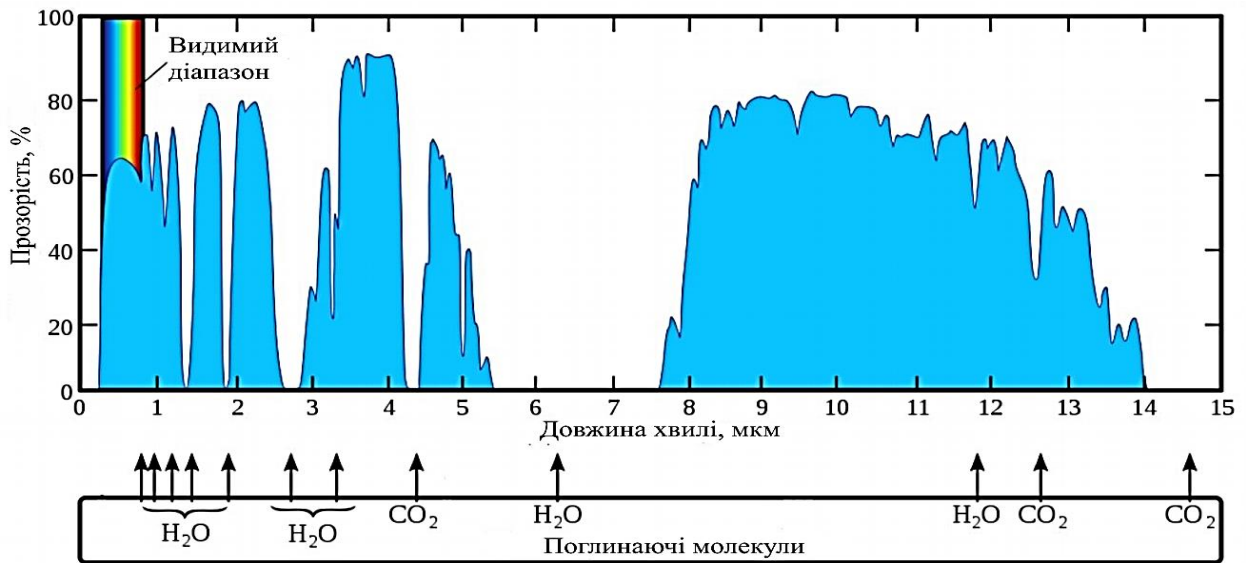


Рисунок 2.2 – Спектр пропускання атмосфери.

Ще більший вплив на вибірковість має атмосферна волога. Масова концентрація вологи в пробі може змінюватися від  $0 \text{ мг/м}^3$  (подача газової суміші з посудини під тиском) до  $40000 \text{ мг/м}^3$  (при вологості 100% та температурі  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ), що при контролі в житловій зоні  $100 \text{ мг/м}^3$  не дозволяє забезпечити необхідну похибку вимірювання (не більше  $25 \text{ мг/м}^3$ ).

Для зменшення впливу атмосферної вологи широке застосування знайшли термоохолодильники, що охолоджують пробу, до температури  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . При охолодженні волога випадає у вигляді конденсату і відводиться з термоохолодильника. Точка роси при температурі  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідає концентрації вологи в пробі на рівні  $5000 \text{ мг/м}^3$ . Подальше зниження вологовмісту проби досить складне технічне завдання, що практично не знайшла вирішення в серійних газоаналізаторах.

Крім того, осушення проби за допомогою термоохолодильників неможливе без одночасного зниження концентрації компонента, що вимірюється (спотворення проби), що впливає на точність вимірювання газоаналізатором.

До недоліків термоохолодильників також слід віднести габаритні розміри, масу та енергоспоживання, які можна порівняти з відповідними параметрами самого газоаналізатора.

З метою досягнення заданої похибки в усьому діапазоні вимірювань потрібно створити модель оптико-абсорбційного газоаналізатора, що має високу чутливість і можливість проводити вимірювання цільової речовини в газовій пробі з наявністю компонентів (атмосферна волога і  $\text{CO}_2$ ) без попередньої пробопідготовки для виключення спотворення. Це завдання є досить складним, оскільки потрібно вимірювати цільовий компонент в умовах зміни рівня атмосферної вологості, більш ніж на три порядки, що перевищує допустиму похибку вимірювання газоаналізатора.

Виділивши для наочності ділянку спектру від 8 до 10 мкм (рисунок 2.3) в якому знаходяться спектральні лінії поглинання фреонів [18], стає очевидним, що газоаналізатор, який контролює один із зазначених фреонів, у зв'язку з накладенням їх спектральних характеристик матиме перехресну чутливість до інших фреонів, які в даному випадку є невимірюваними компонентами.

При подальших розрахунках і дослідженнях приймалося припущення, що газоаналізатор для контролю фреонів встановлюється в місцях, де потенційно можлива поява конкретного фреону (відплив фреону з холодильної машини або кондиціонера, витік або спрацьовування системи хімічної пожежогасіння).

У промисловості фреони застосовуються як холодоагент (холодильне обладнання, системи кондиціонування) або вогнегасник (системи пожежогасіння). Можлива наявність двох фреонів в одному приміщенні, відповідно, в газоаналізаторі потрібно передбачити два канали вимірювання [19-20] фреонів, що допускають наступні поєднання - вогнегасника (114B2 або 227ea) і холодоагенту (12 або 22 або 134a), поява яких в одному приміщенні можлива одночасно [21].

Подальші розрахунки та дослідження будемо проводити для газоаналізатора, який контролює два фреони: фреон 22 – холодоагент і фреон 114B2 – вогнегасник.

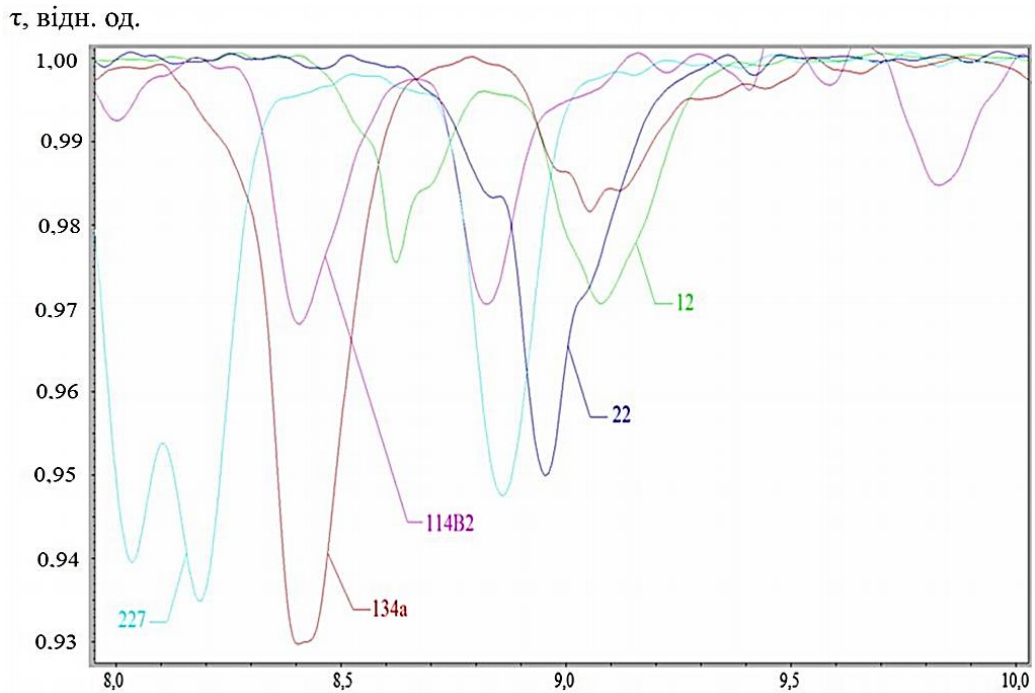


Рисунок 2.3 – Спектр поглинання фреонів у діапазоні від 8 до 10 мкм [21].

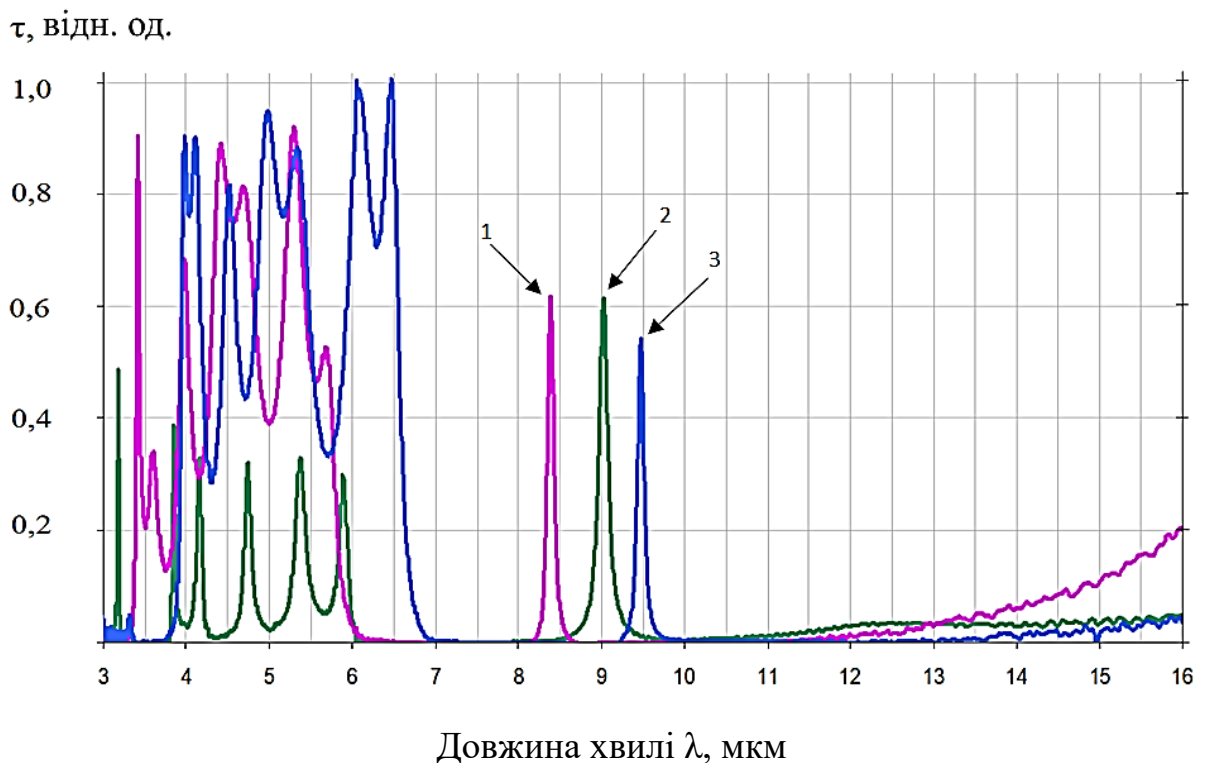
Аналізуючи графіки, наведені рисунку 2.3, можна дійти невтішного висновку, що лінії поглинання фреонів високої інтенсивності перебувають у діапазоні від 8 до 9,3 мкм, але в довжині хвилі 9,5 мкм відсутні. Отже, доцільно використовувати довжину хвилі 9,5 мкм як опорний канал газоаналізатора для компенсації впливу зміни вмісту вологи в аналізованому газовому середовищі і скорочення часу прогріву.

Як елементи, що забезпечують селективність вимірювання фреонів, можна застосовувати вузькосмугові інтерференційні фільтри [22-23]. Фільтр дозволяє збільшити відношення сигнал/перешкода, незважаючи на загальне ослаблення корисного сигналу (потіку випромінювання), що проходить через нього, збільшуючи тим самим поріг виявлення оптико-електронного приладу.

Для виготовлення інтерференційних фільтрів, що працюють у діапазоні довжин хвиль від 8 до 10 мкм, необхідно наносити на підкладку чвертьхвильові плівки в 10-20 разів товщі, ніж для видимого діапазону спектру [24]. Тому напруга та поглинання в плівках, які могли б бути знехтуваними у видимому діапазоні, виявляються в діапазоні від 8 до 10 мкм обмежуючим фактором у конструюванні структур. У діапазоні від 8 до 10 мкм більшість оксидів демонструють високе поглинання. Крім того, підкладки інтерференційних

фільтрів мають високі показники заломлення, і для створення ефективних інтерференційних структур потрібні плівкоутворювальні матеріали з високими показниками. Тому матеріали для видимого діапазону спектру не можуть використовуватися як основні для формування оптичних покриттів в діапазоні від 8 до 10 мкм. Основними плівкоутворюючими матеріалами для діапазону від 8 до 10 мкм виявляються фториди, халькогеніди та напівпровідники [25]. Ці матеріали, як правило, мають значно гірші, ніж оксиди та  $MgF_2$ , параметри механічної та кліматичної стійкості. Для підвищення експлуатаційних характеристик покриттів у багатьох випадках доводиться вводити додаткові функціональні шари та шукати компроміс між міцністю, ефективністю та променевою стійкістю. Оптимальною парою плівкоутворювальних матеріалів за техніко-економічними характеристиками є  $MgF_2$  та Ge.

Приклад комбінації інтерференційних фільтрів, виготовлених на підкладці з германію шляхом нанесення плівок фториду магнію  $MgF_2$  та германію Ge, наведено на рисунку 2.4.



1- 1-й робочий канал (фреон 114В2); 2 - 2-й робочий канал (фреон 22); 3 – опорний канал.

Рисунок 2.4 – Відносний спектральний коефіцієнт пропускання інтерференційних фільтрів [25]

Для вимірювання концентрації двох фреонів одночасно в оптичній схемі необхідно використовувати два робочі канали та один опорний. Робочі фільтри мають довжину хвилі: на каналі 1 – 8,4 мкм (фреон 114В2), на каналі 2 – 9,08 мкм (фреон 22), на опорному каналі – 9,45 мкм.

Аналізуючи графіки, наведені на рисунку 2.4, неважко побачити, що інтерференційні фільтри мають небажаний фон, тобто пропускають деяку частину випромінювання в областях, сусідніх із робочою смугою. Також мають місце побічні максимуми, які необхідно видалити шляхом накладання фільтрів різних типів [25].

Для цього послідовно з інтерференційними фільтрами встановлюється фільтр, що відрізає, спектральний коефіцієнт пропускання якого наведено на рисунку 2.5.

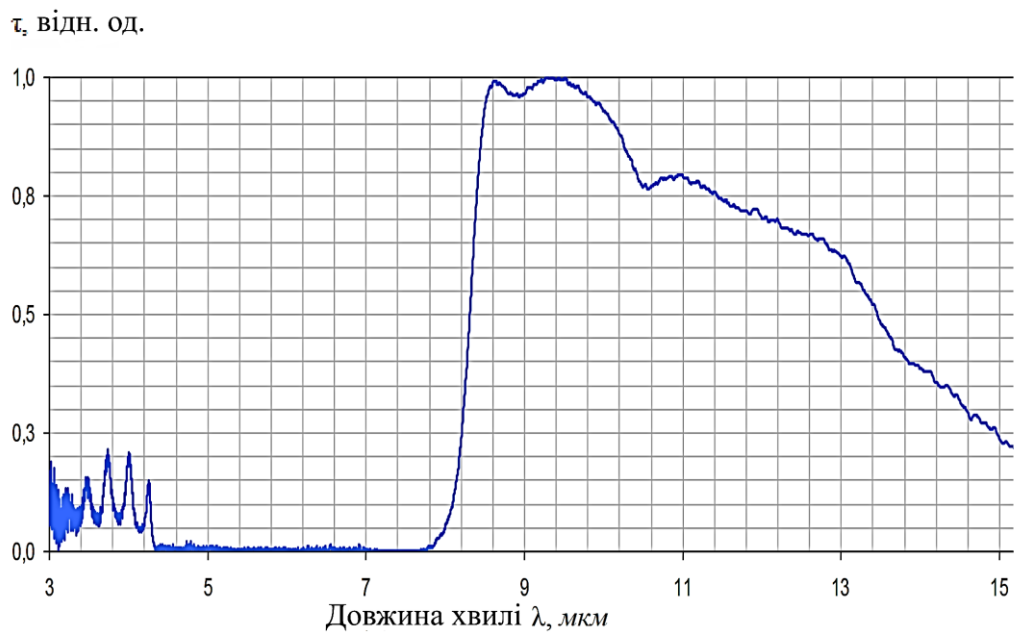
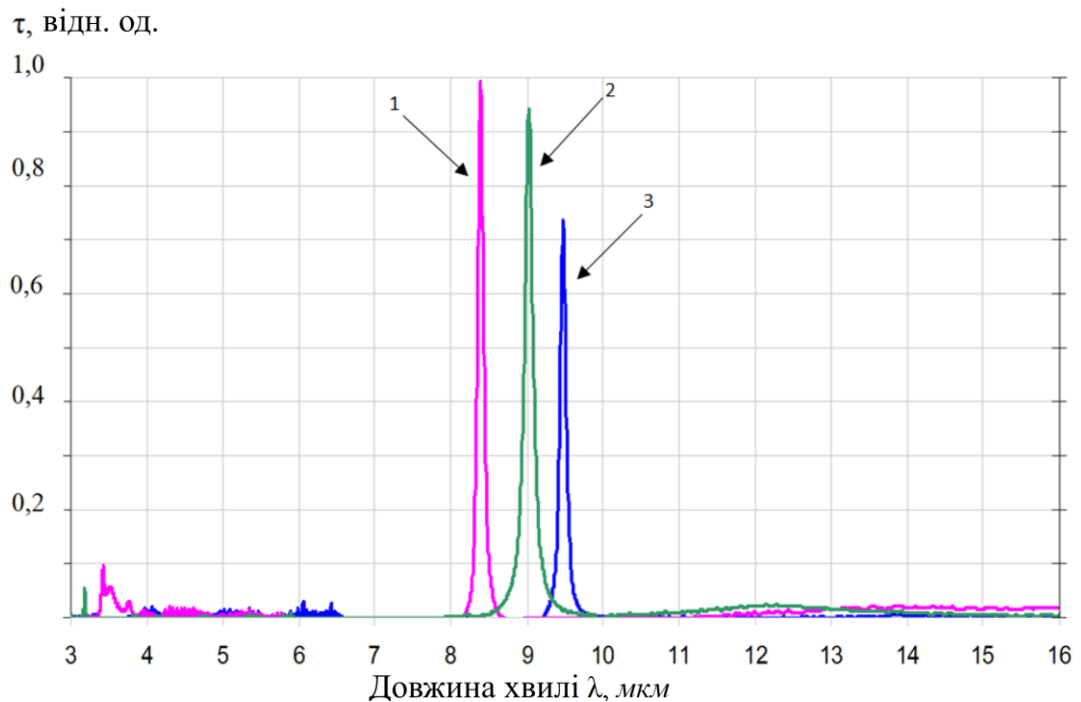


Рисунок 2.5 – Відносний спектральний коефіцієнт пропускання фільтра, що відрізає, в блоці приймачів

Наклавши спектральні коефіцієнти пропускання інтерференційних фільтрів (рисунок 2.4) та відрізаючого фільтра (рисунок 2.5) отримуємо спектральний коефіцієнт пропускання системи оптичних фільтрів (рисунок 2.6).

Розглянувши спектральний коефіцієнт пропускання системи оптичних фільтрів (рисунок 2.6) видно небажане тло в області 3-7 мкм, яке позначатиметься на вибірковості газоаналізатора в частині випарів води та CO<sub>2</sub>.

Додатковий вплив на вибірковість газоаналізатора буде CO<sub>2</sub>, спектральні лінії поглинання якого в довгохвильовій частині спектру знаходяться в області від 14 до 15 мкм.



1- 1-й робочий канал (фреон114B2); 2 - 2-й робочий канал (фреон 22); 3 – опорний канал.

Рисунок 2.6 – Відносний спектральний коефіцієнт пропускання системи оптичних фільтрів [26]

## 2.2 Модель інфрачервоного випромінювача

### 2.2.1 Випромінювальна здатність напівпрозорих тіл

Вимірювання малих концентрацій контрольованого компонента [26] в далекій ІЧ-області вимагає достатньої густини енергетичної світності, що попадає на приймальну площу приймача оптичного випромінювання (ПОВ), на якій відбувається поглинання енергії вимірюваним компонентом. Аналізуючи спектральні характеристики поглинання фреонів, наведених на рисунку 2.1,

можна дійти висновку, що проводити вимірювання концентрації фреонів можна лише на довжинах хвиль від 8 до 10 мкм. Максимум густини енергетичної світності на довжинах хвиль 8 мкм і 10 мкм спостерігається при температурах випромінювача 89 °С і 7 °С відповідно.

За такої температури щільність енергетичної світності ІЧ-випромінювача настільки мала, що зміна концентрації вимірюваного компонента в робочій камері газоаналізатора на рівні ГДК житлової зони не може бути зафіксована ПОВ.

Підвищити енергетичну світність ІЧ-випромінювання на довжинах хвиль від 8 мкм до 10 мкм можливо шляхом підвищення температури випромінювача. щільності енергетичної світності чорного тіла при температурах 290 °С та 600 °С. При зазначеному збільшенні температури щільність енергетичної світності збільшується на довжині хвилі 9,5 мкм у 3 рази, а на довжині хвилі 2 мкм у 38 разів, що призведе до збільшення впливу ПВ на показання газоаналізатора. через недостатнє придушення потоку випромінювання інтерференційними фільтрами в області довжин хвиль ( $\lambda$ ) від 3 до 7 мкм (рисунок 2.2)

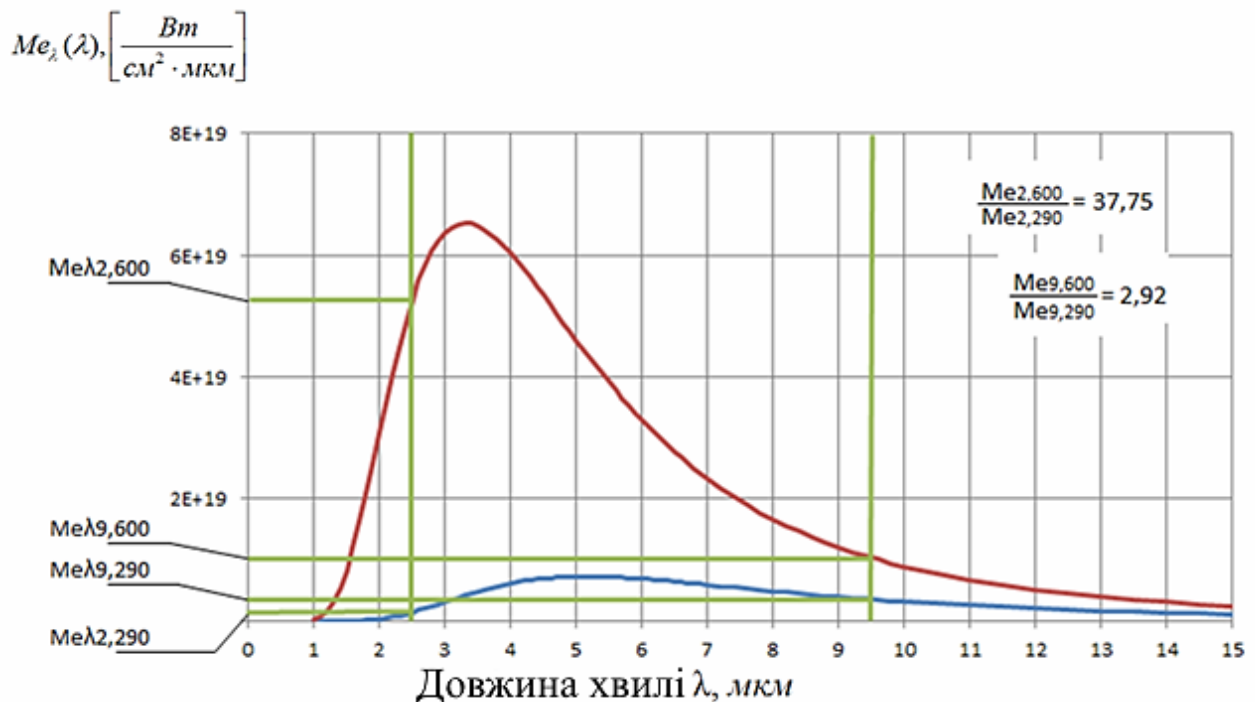


Рисунок 2.7 – Спектральна густина енергетичної світності чорного тіла при температурах 290 °С та 600 °С.

Визначимо коефіцієнт випромінювання  $\varepsilon_{\lambda,T}$  (поглинання  $\alpha_{\lambda,T}$ ) прозорої пластинки завтовшки  $d$ . Нехай на плоскопаралельну пластинку падає випромінювання одиничної інтенсивності (рисунок 2.8).

Поглинання променя після першого проходження пластинки:

$$(1 - \rho_{\lambda,T}) - (1 - \rho_{\lambda,T}) \cdot \tau_{\lambda,T} = (1 - \rho_{\lambda,T}) \cdot (1 - \tau_{\lambda,T}), \quad (2.1)$$

після другого:

$$(1 - \rho_{\lambda,T}) \cdot \tau_{\lambda,T} \cdot \rho_{\lambda,T} - (1 - \rho_{\lambda,T}) \cdot \tau_{\lambda,T}^2 \cdot \rho_{\lambda,T} = (1 - \rho_{\lambda,T}) \cdot (1 - \tau_{\lambda,T}) \cdot \tau_{\lambda,T} \cdot \rho_{\lambda,T}, \quad (2.2)$$

після  $n$  – го:

$$(1 - \rho_{\lambda,T}) \cdot (1 - \tau_{\lambda,T}) \cdot \tau_{\lambda,T}^{n-1} \cdot \rho_{\lambda,T}^{n-1}. \quad (2.3)$$

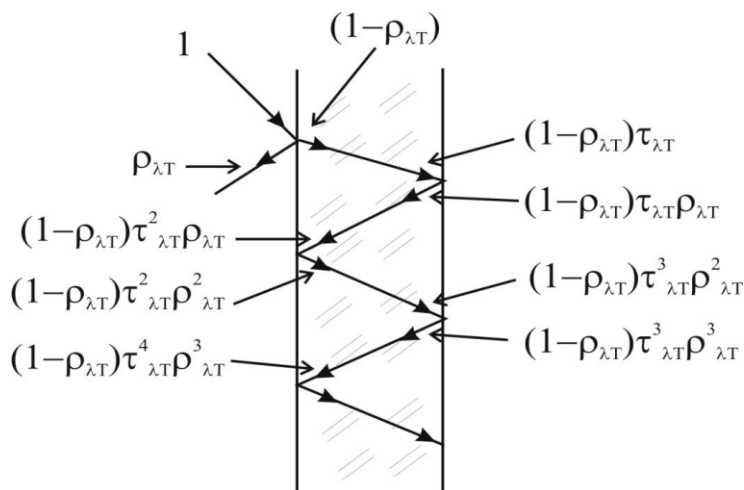


Рисунок 2.8 – Проходження світлового потоку в пластинці

Підсумовуючи результати, отримуємо вираз у формі геометричної прогресії, оскільки  $\rho_{\lambda,T} < 1$  і  $\tau_{\lambda,T} < 1$ :

$$a_{\lambda,T} = \sum_{n=1}^{\infty} (1 - \rho_{\lambda,T}) (1 - \tau_{\lambda,T}) \rho_{\lambda,T}^{n-1} \tau_{\lambda,T}^{n-1} = \frac{(1 - \rho_{\lambda,T})(1 - \tau_{\lambda,T})}{1 - \rho_{\lambda,T} \cdot \tau_{\lambda,T}}. \quad (2.4)$$

Отже, отримуємо вираз для коефіцієнта випромінювальної (поглинальної) здатності напівпрозорої пластинки:

$$\varepsilon_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} = \frac{(1 - \rho_{\lambda,T})(1 - \tau_{\lambda,T})}{1 - \rho_{\lambda,T} \cdot \tau_{\lambda,T}}, \quad (2.5)$$

$$\tau_{\lambda,T} = e^{-K_{\lambda}d}, \quad (2.6)$$

де:  $d$  – товщина шару сірого тіла;  $K_{\lambda}$  - показник поглинання.

Аналізуючи формулу 2.6 можна дійти висновку, що випромінювання напівпрозорих тіл тим ближче до випромінювання чорного тіла, чим більша товщина  $d$ .

Таким чином, для створення інфрачервоного випромінювача із заданим максимумом густини енергетичної світності необхідно використовувати випромінююче тіло мінімальної товщини.

Чорне тіло є еталонним джерелом потоку випромінювання. За стандарт чорне тіло прийнято тому, що його спектральна густина енергетичної світності може бути підрахована теоретично за формулою М. Планка:

$$M_{\lambda,T} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left( e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.7)$$

де:  $C_1=3,7413 \cdot 10^{-6}$  (Вт/м<sup>2</sup>);  $C_2=1,4388 \cdot 10^{-2}$ (м · К) при  $\lambda$  (м).

Модель інфрачервоного випромінювача із заданою спектральною густиною енергетичної світності можна отримати множенням обох частин рівності 2.5 на спектральну густина енергетичної світності чорного тіла (2.7).

Отримане рівняння матиме вигляд:

$$M_{e,\lambda,T} = \frac{(1 - \rho_{\lambda,T})(1 - \tau_{\lambda,T})}{1 - \rho_{\lambda,T} \cdot \tau_{\lambda,T}} C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left( e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.8)$$

Застосовуючи матеріал випромінювача з відомим коефіцієнтом поглинання в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль, згідно з формулою 2.8, можна отримати максимум густини енергетичної світності у необхідній ділянці інфрачервоного діапазону.

### 2.2.2 Дослідження оптичних властивостей матеріалів

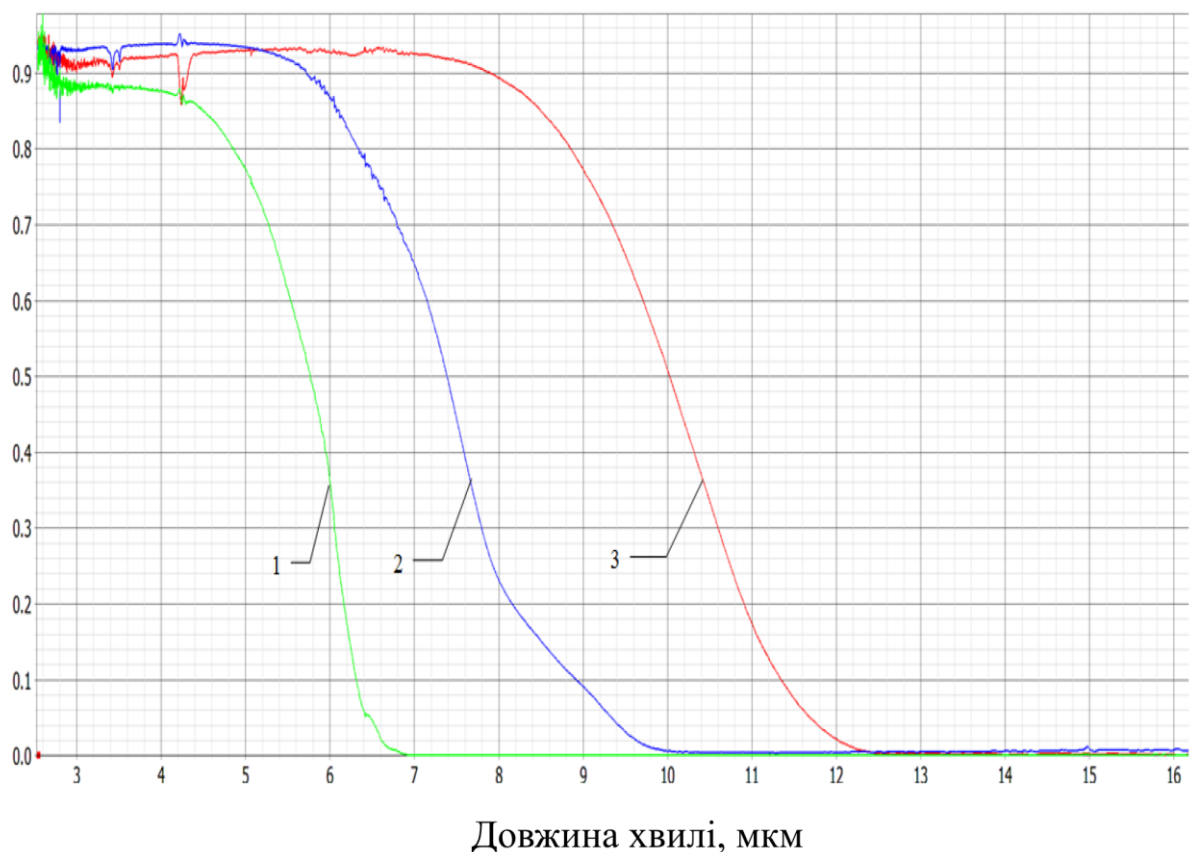
Для розробки та дослідження джерела ІЧ-випромінювання [27, 28], що має максимум спектральної густини енергетичної світності в області від 8 до 10 мкм, необхідний матеріал, що має максимальне значення коефіцієнта випромінювальної (поглинальної) здатності у зазначеній області.

З матеріалів, що мають максимальне значення коефіцієнта випромінювальної (поглинальної) здатності в області від 8 до 10 мкм, були

розглянуті наступні:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (лейкосапфір),  $\text{LiF}$  (фтористий літій),  $\text{CaF}_2$  (дифторид кальцію). Спектральні коефіцієнти пропускання пластин діаметром 22 мм у діапазоні довжин хвиль від 3 до 16 мкм різної товщини ( $d$ ) наведені на рисунку 2.9.

Аналізуючи графіки, наведені рисунку 2.9, можна дійти висновку, що оптимальним на вирішення нашого завдання є використання кристалічного  $\text{LiF}$ , оскільки при нагріванні спектр випромінювання має розпочатися з 6 мкм і вийти максимум на 9 мкм.

$\tau$ , відн. од



1 –  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $d = 1,5$  мм, 2 –  $\text{LiF}$   $d = 4$  мм, 3 –  $\text{CaF}_2$   $d = 3$  мм

Рисунок 2.9 – Спектральний коефіцієнт пропускання

Однак, фтористий літій має низку серйозних недоліків. В умовах підвищеної вологості та високих температур структура матеріалу стає нестабільною, викликаючи його розм'якшення або навіть руйнування. А використання фтористого літію для виготовлення матриць не можливе через

появу у нього центрів забарвлення при впливі випромінювання високої густини.

Таким чином, використання кристалічного LiF не гарантувало б стабільної спектральної характеристики протягом великої кількості років при роботі на високих температурах.

Спектр пропускання  $\text{CaF}_2$  зміщений у довгохвильову область (понад 10 мкм), що не дозволяє використовувати цей матеріал як випромінювач.

Монокристал сапфіру (оптичний лейкосапфір,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) має відмінні оптичні, фізичні та хімічні властивості: є другим за твердістю матеріалом після алмазу; має високу теплопровідність та прозорість; зберігає свої якості за високих температур; хімічно стійкий до кислот і лугів.

$\alpha$ , відн. од.

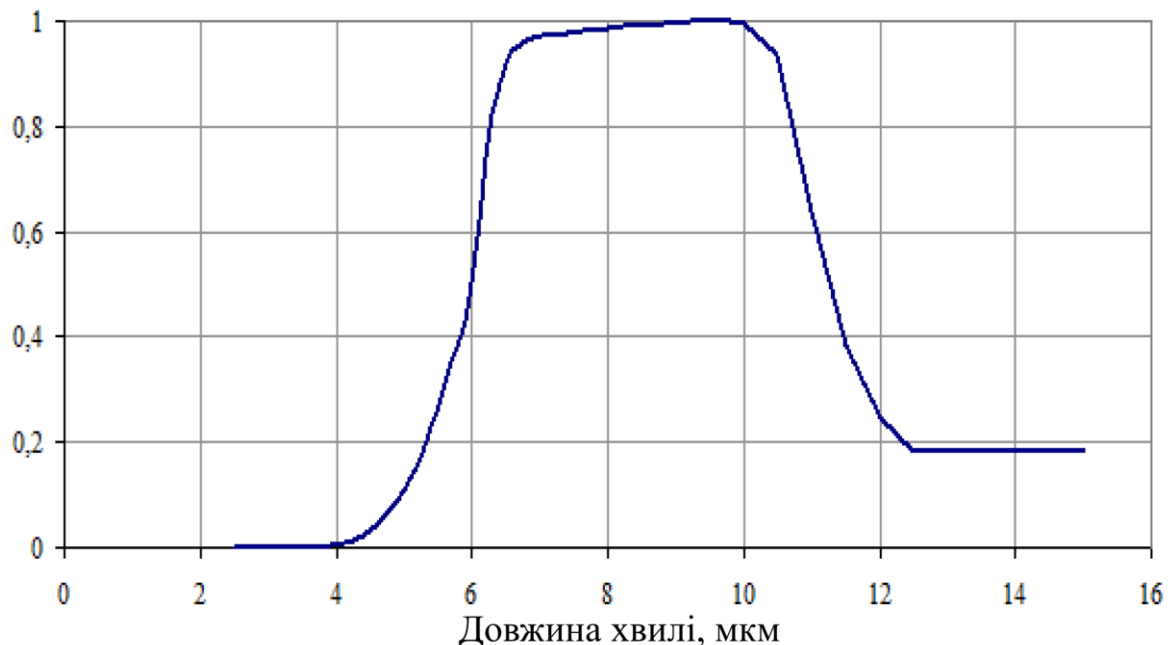


Рисунок 2.10 – Коефіцієнт поглинання пластини лейкосапфіру товщиною 1,5 мм при температурі 297 К.

Таким чином, фізико-хімічні властивості лейкосапфіру при використанні як випромінювача в довгохвильовій інфрачервоній області забезпечують стабільні оптико-механічні характеристики випромінювача.

Для оцінки спектральної густини енергетичної світності лейкосапфіру виконано розрахунок коефіцієнта випромінювальної здатності в області від 2,5 до 15 мкм при температурі 297 К за формулою 2.5 при цьому

використовувалися дані, отримані з літературних джерел [29, 30] Графік значення коефіцієнта випромінювальної здатності при товщині  $d = 1,5$  мм, наведено на рисунку 2.10.

Розрахунок відносної спектральної густини енергетичної світності пластини з лейкосапфіру при температурі  $290^{\circ}\text{C}$  був проведений за формулою 2.8 (рисунок 2.11). Для наочності усунення максимуму спектральної густини енергетичної світності на рисунку 2.11 додатково наведено графік спектральної густини енергетичної світності чорного тіла при температурі  $290^{\circ}\text{C}$ .

Розглядаючи область від 3 до 6 мкм (рисунок 2.11) можна відзначити значне зменшення випромінювання в даній області, що забезпечить повне пригнічення впливу вологості аналізованої суміші на показання газоаналізатора в діапазоні довжин хвиль від 2,5 до 3 мкм і значно зменшить вплив речовин які не вимірюються, і мають лінії поглинання в діапазоні довжин хвиль понад 10 мкм.

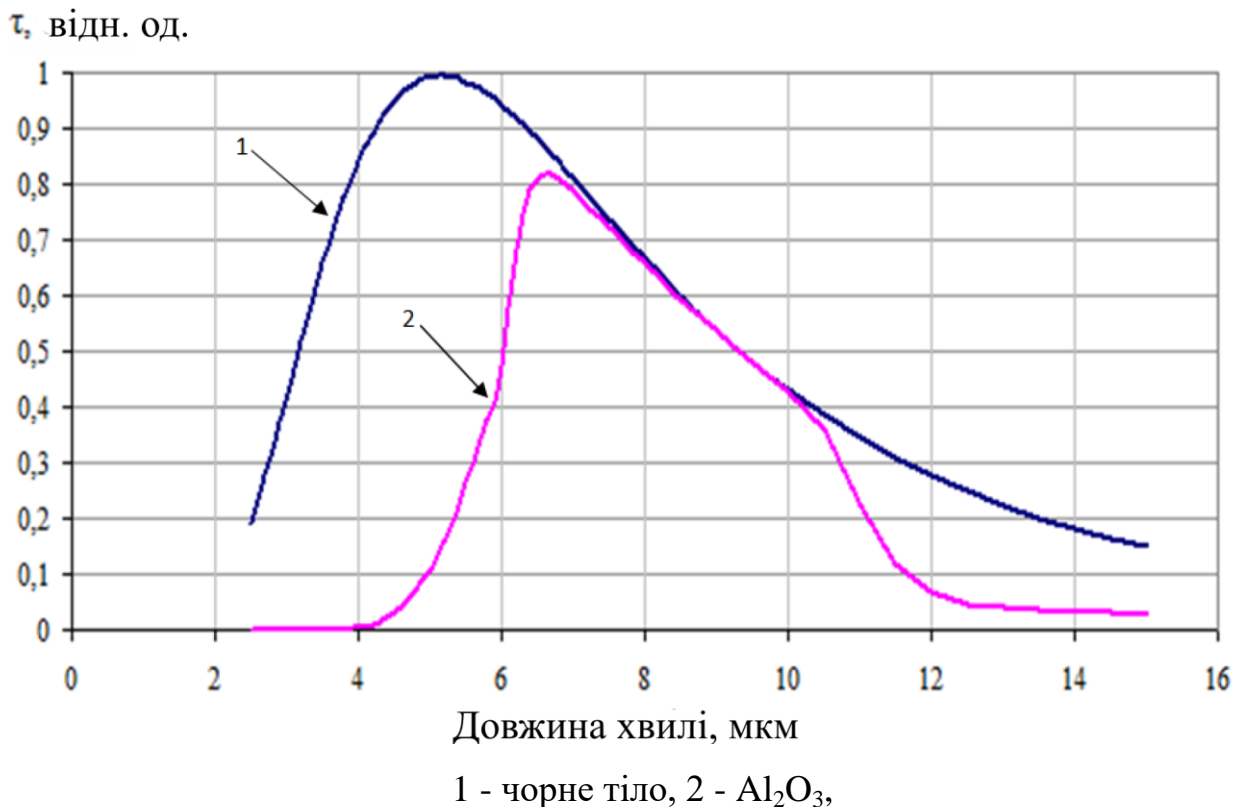


Рисунок 2.11 – Відносна спектральна густина енергетичної світності джерела інфрачервоного випромінювання при температурі випромінювача  $290^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.3 Розробка конструктивних особливостей інфрачервоного випромінювача

Для проведення вимірювання, була запропонована конструкція інфрачервоного випромінювача, на базі стрижня лейкосапфіру яка представлена на рисунку 2.12. Випромінювання виходить через вікно із флюориту (поз.4).

Для підвищення надійності виробу внутрішню частину випромінювача поділено на два об'єми, внутрішній (поз.7) і зовнішній (поз.6).

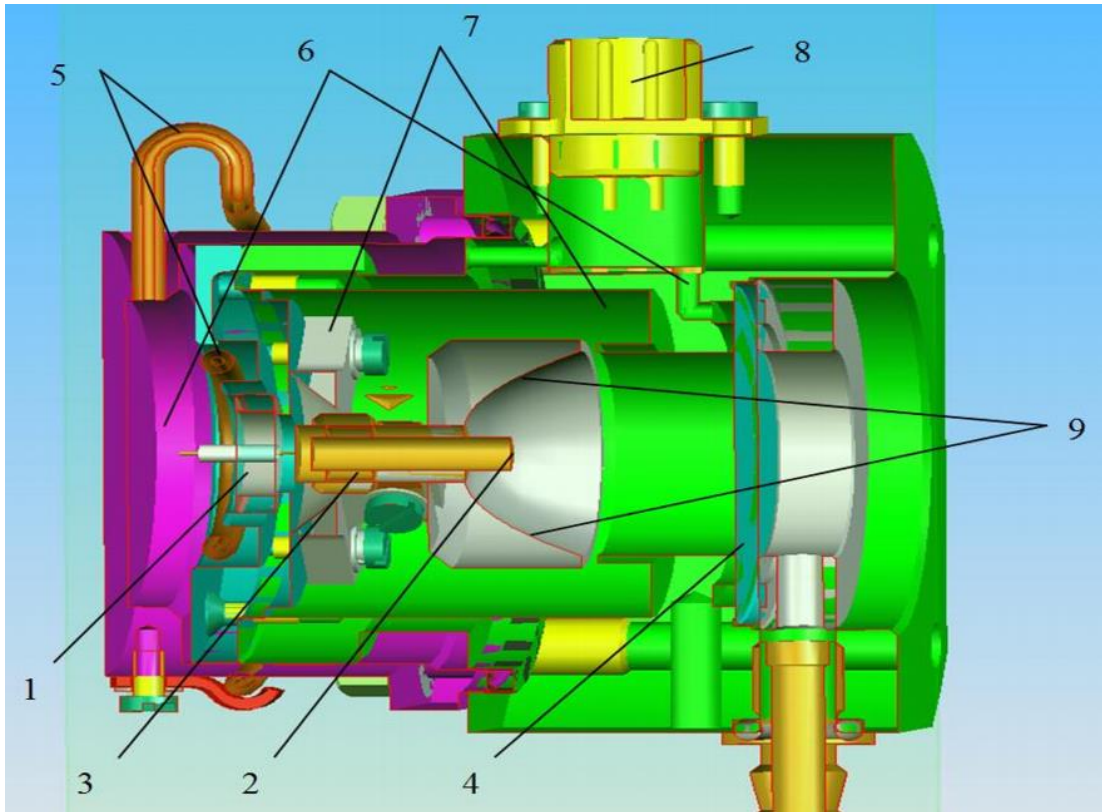
В атмосферному повітрі завжди є  $\text{CO}_2$ . Концентрація  $\text{CO}_2$  у герметичних приміщеннях у присутності людей змінюється у досить широких межах, а внаслідок наявності потужної лінії поглинання  $\text{CO}_2$  на довжинах хвиль 4,26 мкм та 15 мкм збільшення концентрації  $\text{CO}_2$  може вплинути на вимірювання концентрації фреонів. З метою виключення цього впливу, внутрішній об'єм випромінювача заповнені 100%  $\text{CO}_2$ . Таке рішення дозволяє збільшити ККД випромінювача, оскільки коефіцієнт теплопровідності  $\text{CO}_2$  вдвічі менший, ніж у повітря.

При цьому при проходженні інфрачервоного випромінювання від стрижня з лейкосапфіру до вікна з флюориту через середовище  $\text{CO}_2$ , в спектрі випромінювання лінії поглинання  $\text{CO}_2$  будуть вирізані.

Відкачування та заповнення внутрішніх об'ємів проводяться через капіляри (поз.5). Живлення на нагрівач (поз.3) подається через прохідний ізолятор (поз.1), який відокремлює внутрішній та зовнішній об'єми та герметичний роз'єм (поз.8).

Нагріваючись стержень з лейкосапфіру, випускає ІЧ-випромінювання, яке збирається дзеркальним параболічним об'єктивом (поз.9) у паралельний пучок, що виходить з випромінювача через пластину з флюориту (поз.4).

Як вихідне вікно використовується пластину з флюориту для придушення випромінювання в області більше 12 мкм.



1 – прохідний ізолятор; 2 - стрижень із лейкосапфіру діаметром 3 мм; 3 – нагрівач; 4 – вікно з флюориту; 5 – капіляри; 6 – зовнішній об'єм; 7 – внутрішній об'єм; 8 – герметичний роз'єм; 9 – дзеркальний параболічний об'єктив.

Рисунок 2.11 – Конструкція випромінювача інфрачервоного спектру

Дане технічне рішення дозволяє повністю пригнічувати паразитне засвічення матриці в областях спектру менше 8 мкм та більше 10 мкм, що забезпечує зменшення впливу невимірюваних компонентів газового середовища (переважно атмосферної вологи) до мінімальних значень.

### 2.3 Вибір приймача оптичного випромінювання

При виборі та застосуванні приймачів випромінювання доцільно керуватись деякими загальними практичними рекомендаціями [30-32].

Важливим параметром, що забезпечує ефективну роботу ПОВ є його оптичне узгодження з джерелом випромінювання. Узгоджують елементи за спектральним складом, чутливістю та часом наростання.

Спектральні характеристики приймачів різних типів наведено на рисунку 2.12. В інфрачервоній області спектру певними перевагами мають теплові приймачі випромінювання. Такі приймачі чутливі в дуже широкій області спектру, причому для них характерна рівномірність чутливості спектрального діапазону.

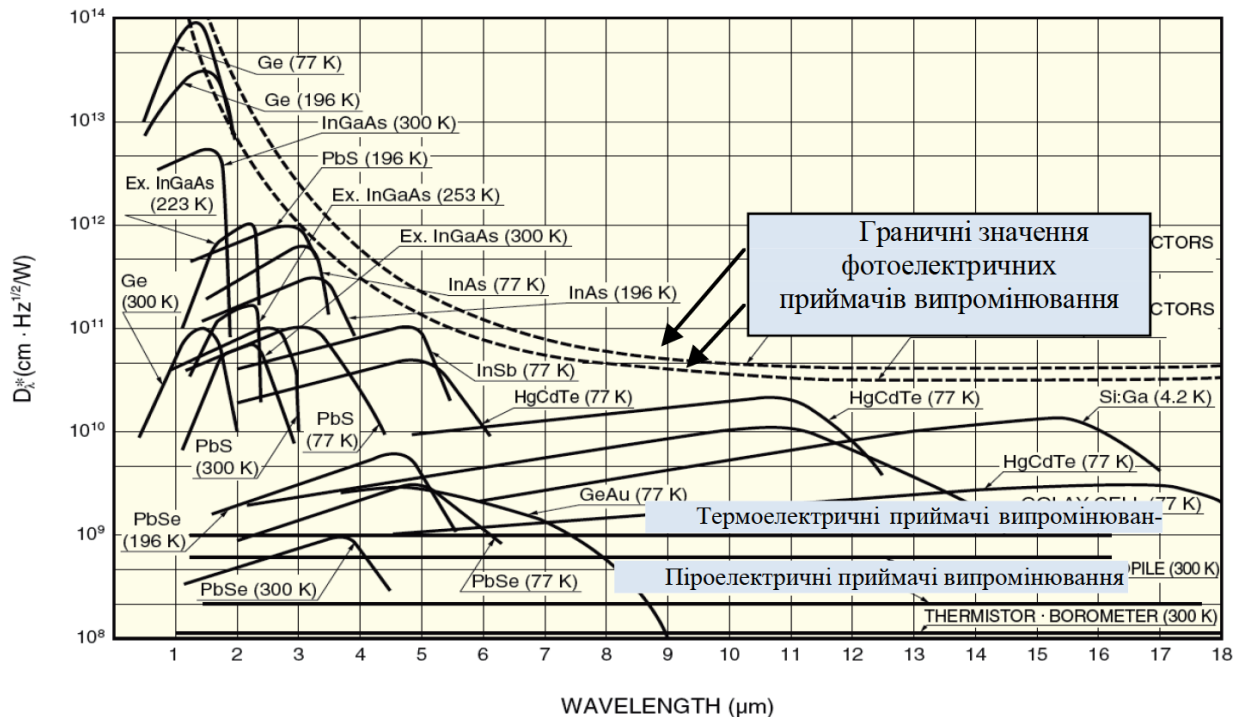


Рисунок 2.12 - Спектральні характеристики приймачів різних типів

Проаналізувавши дані (рис. 2.12), можна зробити висновок, що для досягнення високої чутливості ПОВ на внутрішньому фотоелектричному ефекті вимагають охолодження до температур 77 К і нижче, що унеможливує використання ПОВ на внутрішньому фотоелектричному ефекті в автоматичних газоаналізаторах.

Піроприймачі, за величиною інтегральної вольтової чутливості ненабагато поступаються ПОВ на внутрішньому фотоелектричному ефекті, але при цьому не потребують охолодження.

Принцип дії піроприймача ґрунтується на тому, що при тепловому впливі на кристал сегнетоелектрика на поверхні кристала утворюються електричні заряди [32, 33].

Температура  $T_K$  (сегнетоелектрична точка Кюрі) є температурою фазового переходу, нижче цієї температури сегнетоелектрик має доменну структуру та

характерні сегнетоелектричні властивості; вище цієї температури відбувається розпад доменної структури і сегнетоелектрик переходить у параелектричний стан. Наслідком доменної будови сегнетоелектриків є нелінійна залежність їх поляризованості або електричної індукції від напруженості електричного поля, яка носить назву діелектричної петлі гістерезису, і різко виражена температурна залежність діелектричної проникності, температурі, що відповідає  $T_K$ .

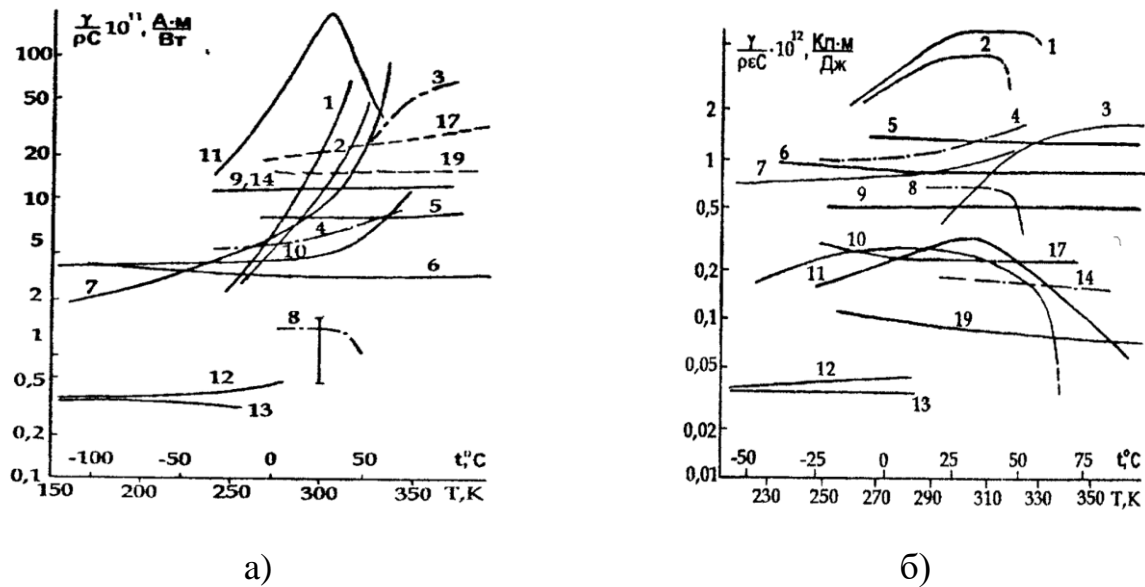
Зміна поляризації ( $P$ ) у сегнетоелектриках складається з двох механізмів: індукованої поляризації ( $P_{\text{інд}}$ ) та поляризації, пов'язаної з переорієнтацією доменів ( $P_{\text{дом}}$ ):

Як впливає з аналізу петлі діелектричного гістерезису при малих значеннях напруженості поля  $E$  основний внесок у поляризацію робить індукована частина  $P_{\text{інд}}$ . Зі зростанням поля напруженості  $E$  поблизу точок переполіаризації, що характеризуються значеннями коерцитивного поля  $E_K$ , залежність  $\epsilon(E)$  проходить через максимуми, що визначаються вкладом доменної переполіаризації  $P_{\text{дом}}$ .

Температурні залежності параметрів якості струмової чутливості  $S_i$  та вольтової чутливості  $S_v$  для різних піроелектричних матеріалів, у тому числі і для лінійних піроелектриків, наведено в напівлогарифмічному масштабі на рисунку 2.13(а) та 2.13(б) відповідно [30]. Ці параметри дозволяють оцінити термостабільність піроелектричних матеріалів у робочому інтервалі температур від  $-60$  до  $+100$  °С.

Варто зауважити, що кристали, які мають максимальну чутливість по пірокоефіцієнту, не належать до термостабільних. Як правило, це сегнетоелектрики з  $T_K$ , розташованою в околі  $573$  °С.

Досить термостабільними є кристали танталату літію ( $\text{LiTaO}_3$ ) та ніобату літію ( $\text{LiNbO}_3$ ) Крім термостабільності дані кристали є хімічно та механічно міцними.



1 – TGS (TGS); 2 – DTGS (DTGS); 3 – BaTiO<sub>3</sub>; 4 – Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O; 5 – LiTaO<sub>3</sub>; 6 – LiNbO<sub>3</sub>; 7 – Pb<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>11</sub>; 8 – PVF<sub>2</sub>; 9 – SbNbO<sub>4</sub>; 10 – Sn<sub>2</sub>P<sub>2</sub>S<sub>6</sub>; 11 – Sr<sub>0,75</sub>Ba<sub>0,25</sub>Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; 12 – CdS; 13 – ZnO; 14 – ЦТССТ-5; 15 – ЦТС-23; 16 – ЦТС-19; 17 – PZT-4 (ЦТС); 18 – PZT-6 (ЦТС); 19 – PZTG-1306 (ЦТС)

Рисунок 2.13 - Температурна залежність струмової (а) та вольтової (б) чутливості різних піроелектриків

Піроприймач не потребує джерела живлення, що є великою перевагою даного приймача з іншими тепловими приймачами [31].

Другою основною перевагою піроприймача є незалежність порогу чутливості від величини площі приймальної поверхні.

При розрахунках враховуватимемо, що піроприймач є тепловим неселективним приймачем з коефіцієнтом використання приймачем випромінювання, рівним 1.

## 2.4 Розрахунок втрат в оптичній системі газоаналізатора

При проходженні випромінювання через оптичну систему відбуваються втрати [32], в основному, за рахунок поглинання в товщі матеріалу, з якого виготовлені оптичні деталі, через відображення на межі, що розділяє два

середовища, різні за показником заломлення, за рахунок поглинання в шарах, дзеркал що відбивають.

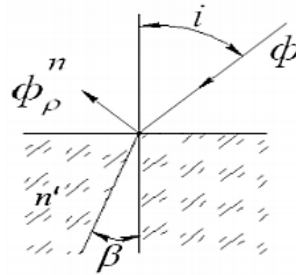


Рисунок 2.14 – Заломлення на межі двох середовищ

Відбите випромінювання на межі двох середовищ (рисунок 2.14) [36] визначається формулою Френеля, яку при куті падіння  $i$  можна записати в такому вигляді:

$$p = \frac{\Phi_{p,\lambda}}{\Phi_{0,\lambda}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(i - \beta)}{\sin^2(i + \beta)} + \frac{\text{tg}^2(i - \beta)}{\text{tg}^2(i + \beta)} \right]. \quad (2.9)$$

При цьому  $n \cdot \sin i = n' \cdot \sin \beta$ ,  $n$  - показники заломлення середовищ;  $i$ ,  $\beta$  - кути падіння та заломлення;  $\Phi_{p,\lambda}$  - відбитий потік випромінювання;  $\Phi_{0,\lambda}$  - падаючий потік випромінювання.

Найбільші втрати випромінювання на відображення відбуваються на межі повітря-середовище, найменші втрати - на межі середовищ, які мають близькі показники заломлення, наприклад, на поверхні склеювання двох лінз.

При малих кутах  $i$  та  $\beta'$  можна записати:

$$p^\lambda = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(i - \beta)}{\sin^2(i + \beta)} + \frac{\text{tg}^2(i - \beta)}{\text{tg}^2(i + \beta)} \right] = \left( \frac{i - \beta'}{i + \beta} \right)^2. \quad (2.10)$$

Маючи на увазі, що  $ni = n'\beta$ , отримуємо:

$$p^\lambda = \left( \frac{n' - n}{n' + n} \right)^2. \quad (2.11)$$

В оптичному блоці більшість оптичних деталей виготовляється з матеріалу з  $n' = 4$ . Для зменшення втрат на відображення на величину не більше 2% усі оптичні деталі зазнають просвітлення. Так як оптичні матеріали є, як правило,

однорідними та ізотропними, то поглинання випромінюючого через них випромінювання підпорядковується експоненційному закону Бугера.

Загальний коефіцієнт пропускання можна знайти множенням коефіцієнтів пропускання окремих деталей з урахуванням втрат на відображення та поглинання:

$$T = \prod_{K=1}^{K=m} \tau_{p,K} \prod_{K=1}^{m+1} \tau_{n,K} , \quad (2.12)$$

де  $\Pi$  - Оператор множення;  $m$  - число меж (середовищ на одну більше, ніж меж);  $m+1$  – число середовищ;  $\tau_p$  – коефіцієнт пропускання з урахуванням поверхонь, що відбивають;  $\tau_n$  – коефіцієнт пропускання поглинаючих середовищ.

Перший член формули (2.12) враховує втрати на відображення, другий - втрати на поглинання.

Для початку розрахуємо коефіцієнт пропускання пластини флюориту, що має показник заломлення  $n' = 1,35$  на довжині хвилі 8 мкм [36]:  $\tau = 1 - \rho$ , попередньо  $\rho$  визначимо за формулою 2.11:

$$\rho = ((1,35-1)/(1,35+1))^2 = 0,022.$$

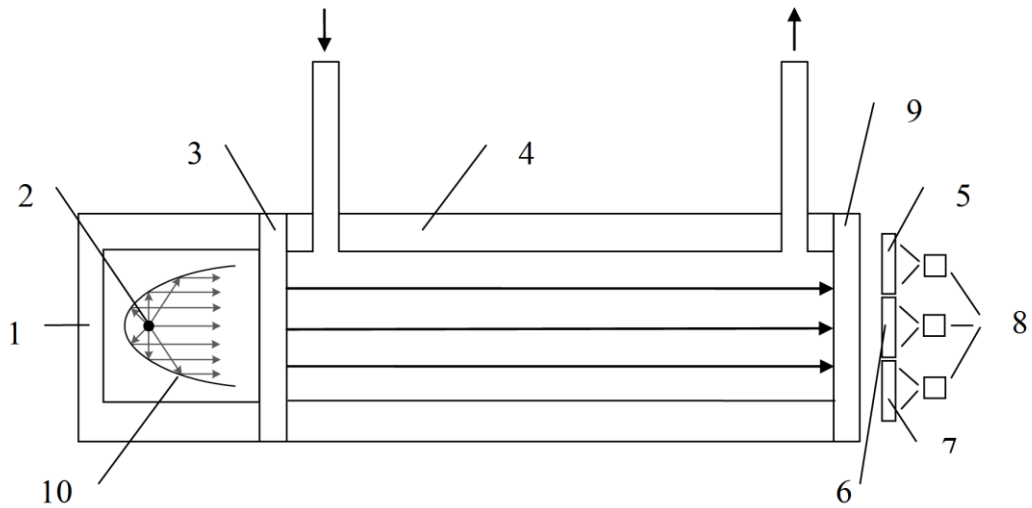
В результаті отримаємо значення  $\tau$ :

$$\tau = 1 - \rho = 1 - 0,022 = 0,978$$

Згідно з оптичною схемою, наведеною на рисунку 2.15, втрати випромінювання присутні при проходженні випромінювання через пластину просвітленого германію (поз.3,  $\tau = 0,95$ ), фільтр, що відрізає ( $\tau = 0,90$ ), пластину з флюориту (поз.9) та інтерференційні фільтри (поз.5,6,7,  $\tau = 0,2$ ), для алюмінієвої поверхні дзеркального параболічного об'єктива коефіцієнт відбиття  $\tau = 0,85$ .

Таким чином, коефіцієнт пропускання оптичної системи ( $\tau$ ) складає:  $\tau = 0,85 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 0,978 \cdot 0,978 \cdot 0,2 \cdot 0,85 = 0,139$ .

У подальших розрахунках використовуватимемо значення  $\tau = 0,14$ .



1 – випромінювач, 2 – джерело випромінювання, 3 – пластина флюориту, 4 – робоча камера, 5 – інтерференційний фільтр 1-го каналу, 6 – інтерференційний фільтр 2-го каналу, 7 – інтерференційний фільтр опорного каналу, 8 – піроприймачі, 9 - фільтр, що відрізає, і пластина просвітленого германію , 10 - дзеркальний параболічний об'єктив

Рисунок 2.15 – Оптична схема

## 3 ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ВУЗЛІВ ГАЗОАНАЛІЗАТОРА

### 3.1 Розробка функціональної схеми газоаналізатора

При виконанні цієї роботи було розроблено та досліджено газоаналізатор, який працює на методі модуляції проби тиском, функціональна схема якого наведена на рисунку 3.1, а циклограма роботи – на рисунку 3.2.

Газоаналізатор складається з трьох блоків: блок пробопідготовки (далі – БПП), блок аналітичний (далі – БА), блок управління та комутації (далі – БУ).

Газова суміш (далі – ГС) закачується через вхідний фільтр Ф за допомогою насоса 1 (далі – Н1), який створює тиск ГС у резервуарі 1 (далі – Р1). За допомогою насоса 2 (далі - ПР2) створюється розрідження аналізованої ГС в резервуарі 2 (далі - Р2). Електромагнітний клапан 1 (далі - КЛ1) відкривається при закритому електромагнітному клапані 2 (далі - КЛ2) і ГС під тиском з резервуара Р1 надходить в робочу камеру. У робочій камері створюється надлишковий тиск ( $P^+$ ):

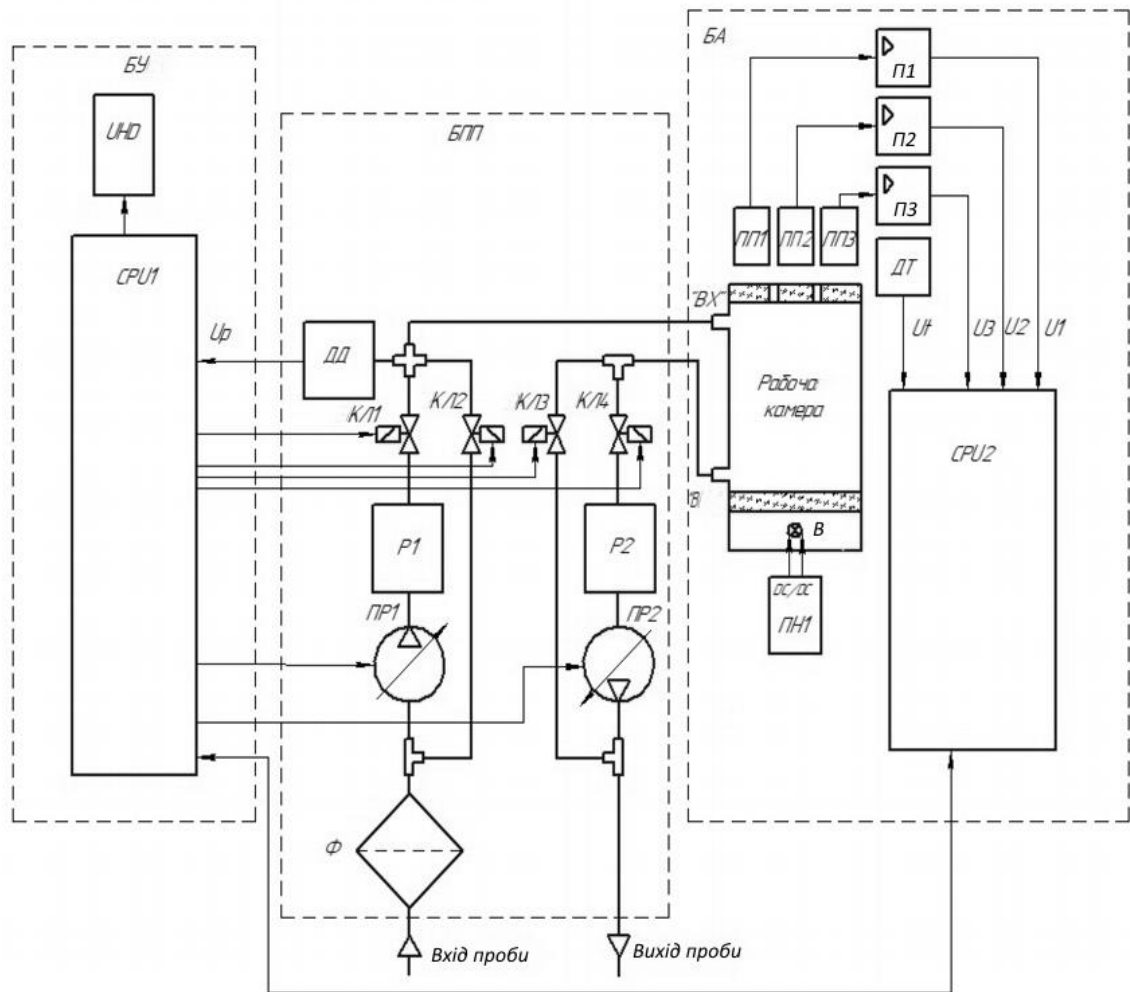
$$P^+ = P_{атм} + \Delta P , \quad (3.1)$$

де:  $P_{атм}$  - поточний атмосферний тиск, кПа;  $\Delta P$  – перепад тиску, що створюється в робочій камері, кПа.

Потім КЛ1 закривається і відкривається електромагнітний клапан 3 (далі - КЛ3) відбувається падіння тиску  $\Delta P$  в робочій камері до атмосферного  $P_{атм}$ .

КЛ3 закривається і відкривається електромагнітний клапан 4 (далі - КЛ4). ДС з робочої камери забирається в резервуар Р2, в якому насос ПР2 створює розрідження ( $P^-$ ):

$$P^- = P_{атм} - \Delta P , \quad (3.2)$$



БПП - блок пробопідготовки, БА - блок аналітичний, БУ - блок управління та комутації, UHD – індикатор, CPU1, CPU2 – процесори 1 та 2, P1, P2 – резервуари 1 та 2, PP1, PP2 – насоси 1 та 2,  $\Phi$  – фільтр, ДД – датчик тиску, КЛ1 - КЛ4 – електромагнітні клапани 1 - 4, ПН1 – перетворювач напруги, В – випромінювач, ПП1 – ПП3 – піроприймачі 1 - 3, П1 – П3 підсилювачі 1 – 3, ДТ – датчик температури.

Рисунок 3.1 – Функціональна схема газоаналізатора

Далі КЛ4 закривається, після чого відкривається КЛ2. Тиск у робочій камері зростає до атмосферного. Стабільність підтримання тиску забезпечується вимірюванням поточного тиску (надлишкового, атмосферного та розрідження) у робочій камері за допомогою датчика тиску ДТ та стабілізується на необхідному рівні керуванням роботою PP1 та PP2. Алгоритм роботи електромагнітних клапанів пояснює циклограма, наведена на рисунку 3.2.

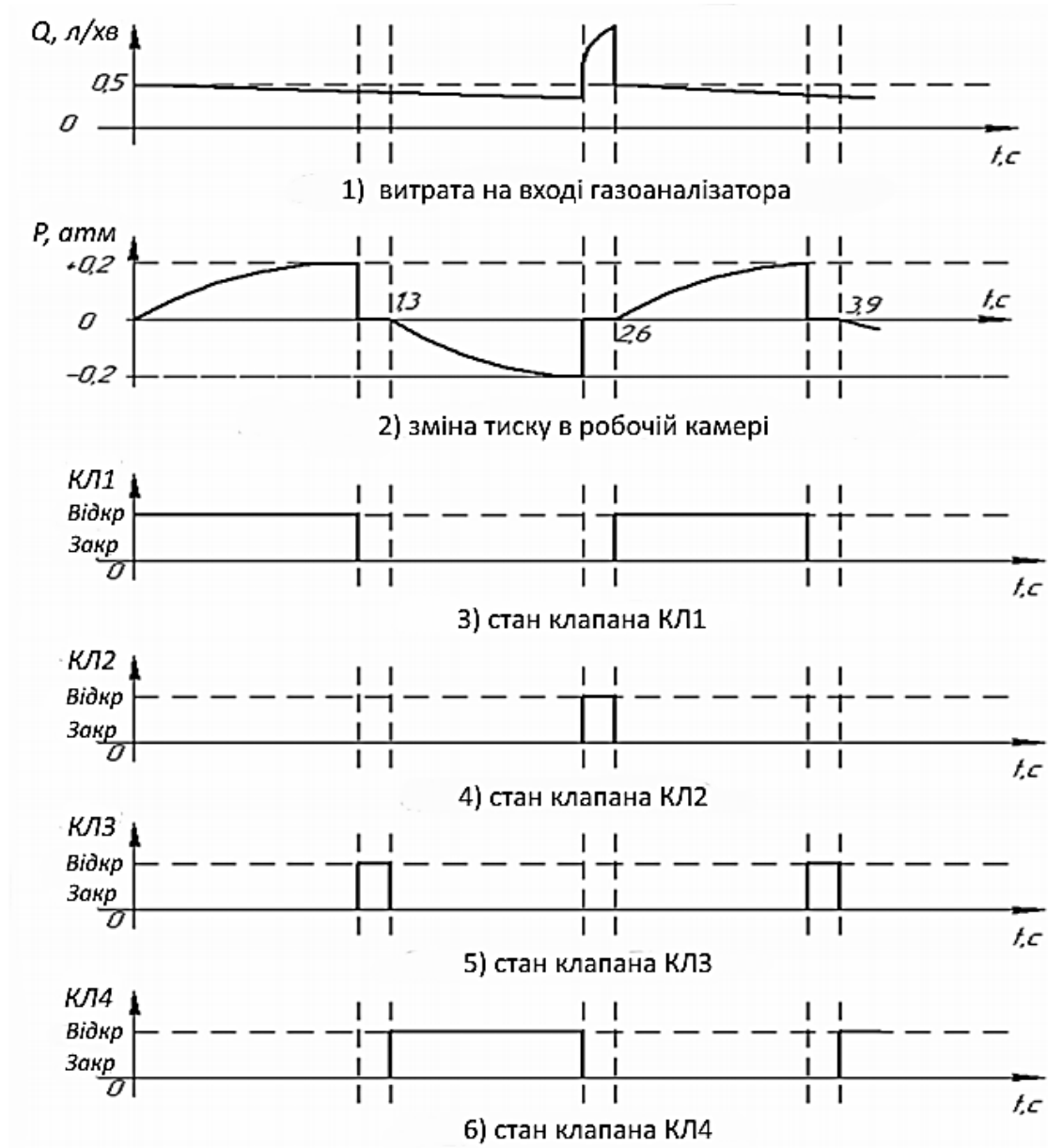


Рисунок 3.2 – Циклограма роботи електромагнітних клапанів

Циклограма роботи електромагнітних клапанів повторюється з періодом 2,6 (що відповідає частоті модуляції 0,385 Гц), забезпечуючи модуляцію тиску аналізованого газового середовища в робочій камері (рисунок 3.2 циклограма 2).

У такому режимі роботи практично повністю відсутній вплив зовнішніх факторів, що впливають, на нульові показання газоаналізатора, що дозволяє домогтися високих метрологічних характеристик газоаналізатора і стабільності його метрологічних характеристик.

З одного боку робочої камери встановлено випромінювач. З іншого боку камери розташовані три піроприймачі (ПП1, ПП2, ПП3, див. рисунок 3.1), із встановленими перед ними оптичними фільтрами, які пропускають випромінювання по лініях поглинання визначених компонентів. Кожен приймач сприймає лише випромінювання, яке пропускає відповідний інтерференційний фільтр. Сигнали з піроприймачів посилюються трьома підсилювальними каналами, що складаються з підсилювачів П1-П3. Для температурної компенсації призначено датчик температури ДП. Аналогові значення напруги  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  та  $U_t$  надходять на входи аналого-цифрового перетворювача (далі – АЦП) процесора CPU2. Дані концентрації виводяться на індикатор UHD.

Управління тиском здійснюється за допомогою процесора CPU1 за напругою  $U_p$  з датчика тиску - ДД, задаючи необхідну продуктивність ПР1 та ПР2.

Стабільність нагрівання випромінювача забезпечується стабілізатором напруги DC/DC CH1.

Частота модуляції визначається представленою на малюнку 2.24 залежністю відносної чутливості приймачів оптичного випромінювання від частоти в герцах, а глибина модуляції - продуктивністю насосів витрати  $Q$  при відповідному перепаді.

Далі подано розрахунок роботи газової схеми з пневматичною модуляцією на вищевказаній частоті (0,385 Гц).

При аналізі продуктивності насосів витрати при температурах 20 °С та 50 °С, відомих із їх характеристик, стає очевидним, що величина модуляції повинна перебувати в межах від 0,1 до 0,3 кг/см<sup>2</sup>.

У разі збільшення глибини модуляції понад 0,3 кг/см<sup>2</sup> різко зростає навантаження на насоси, що скорочує ресурс їхньої роботи. При зменшенні глибини модуляції менше 0,1 кг/см<sup>2</sup> пропорційно зменшується співвідношення сигнал/шум газоаналізатора, що призводить до зниження чутливості нижче допустимого значення.

Задамо величину зміни тиску в робочій камері в середині допустимого діапазону від 0,1 до 0,3 кг/см<sup>2</sup>:

$$\Delta P = 0.2P_{атм} , \quad (3.3)$$

Потрібно розрахувати продуктивності Н1 і Н2 за заданою формулою 3.3 величиною зміни тиску в робочій камері. Відповідно до алгоритму роботи газоаналізатора описаним вище, насосом Н1 за час 1,4 с, створюється надлишковий тиск. Після відкриття клапана ЕКЛ1 у сумарному внутрішньому об'ємі ресивера Р1 та робочої камери (далі – робочий об'єм) за час рівний 1,2 с створюється надлишковий тиск 0,2 кг/см<sup>2</sup>, тобто компресор за 1,2 с накачує 20 мл проби з урахуванням надлишкового тиску, створеного в ресивері за 1,4 с.

Відразу після закриття клапана тиск у робочій камері зменшується до атмосферного, а ресивері дорівнює 0,2 кг/см<sup>2</sup>, що відповідає 10 мл.

Вважаємо, що продуктивність насоса незмінна. Розрахуємо продуктивність насоса, необхідну для досягнення необхідного перепаду тиску, і складемо рівняння, де Q (мл/с) – продуктивність насоса:

$$\begin{aligned} 1,2Q + 1,4Q + 10 &= 20 \\ 2,6Q &= 10 \\ Q &= 3,846 \end{aligned} , \quad (3.4)$$

Таким чином, продуктивність одного насоса складе Q=0,2308 л/хв. Сумарно продуктивність насосів Н1 і Н2 складе 2·Q = 0,462 л / хв. Графік витрати проби на вході газоаналізатора наведено на малюнку 3.6, циклограма 1.

Для досягнення високої надійності роботи потрібно оптимізувати режим роботи насосів Н1 та Н2 за допомогою ресиверів Р1 та Р2, які мають оптимальний об'єм.

На рисунку 3.3 представлена залежність зміни тиску в робочому об'ємі від об'єму V ресиверів за постійної витрати Q=0,2308 л/хв. Очевидно, що з одного боку, чим більшим буде об'єм ресивера, тим меншим буде навантаження на насоси, і збільшиться час аналізу у зв'язку зі збільшенням об'єму, через який потрібно прокачати пробу для аналізу.

Аналізуючи отримані дані щодо зміни тиску в робочому об'ємі представлену на рисунку 3.3, можна зробити висновок про те, що робочий

об'єм, при якому насос, що створює розрідження при температурі 50°C, знаходиться в допустимому режимі роботи повинен бути не менше 141,5 мл. При цьому швидкодія газоаналізатора не повинна перевищувати 5 хв, і за цей час у робочому об'ємі має відбутися кілька повних змін газового середовища, кількість яких залежить від витрати насосів витрати та об'єму ресиверів.

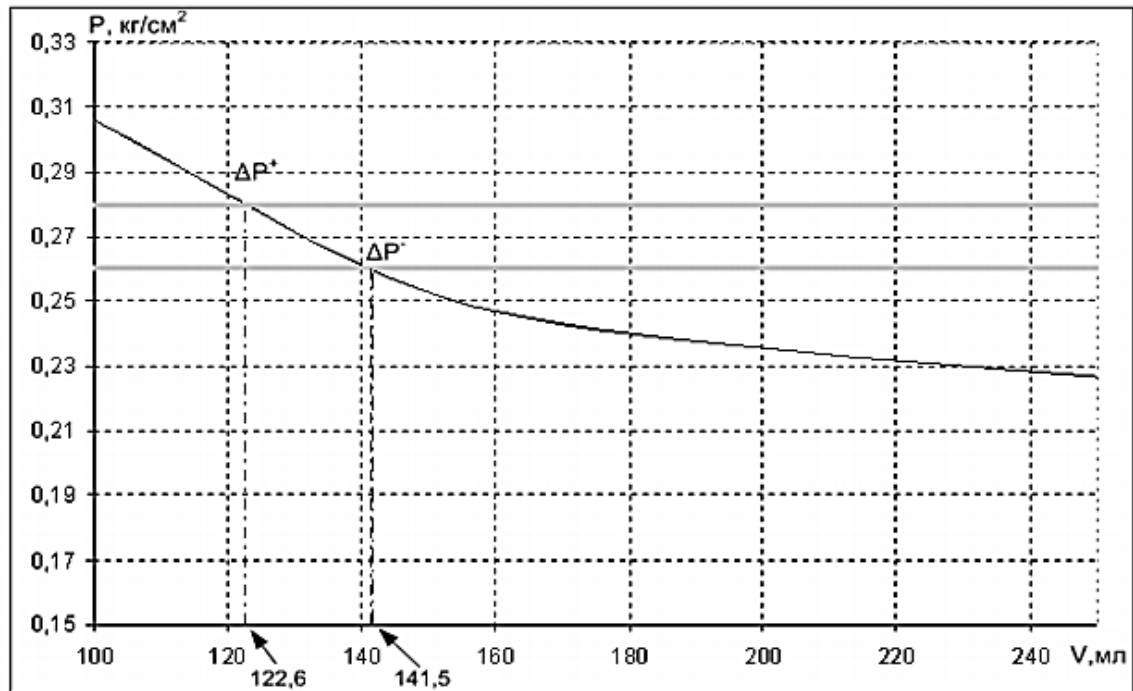


Рисунок 3.3 – Залежність зміни тиску у робочому об'ємі від об'єму ресиверів.

З огляду на діапазон вимірювання газоаналізатора (від 0 до 4000 мг/м<sup>3</sup>) найгірший варіант зміни концентрації буде при її зменшенні від 4000 мг/м<sup>3</sup> до 0 мг/м<sup>3</sup>. Абсолютна похибка вимірювання газоаналізатора в діапазоні виміру від 0 до 100 мг/м<sup>3</sup> має бути не більше ніж 25 мг/м<sup>3</sup>.

Враховуючи обмеження швидкодії, які пред'являються до газоаналізатора не більше 5 хв (300 с), можна зробити висновок про те, що сума робочого об'єму та об'єму вхідних фільтрів не повинна перевищувати 145 мл. Розрахована, таким чином, пневматична схема газоаналізатора дозволяє отримати необхідну чутливість при високому ресурсі роботи вузлів газоаналізатора.

### 3.2 Математичне моделювання електронного підсилювача газоаналізатора

Моделювання роботи одного з каналів підсилення (схема наведена на рисунку 3.4) проводилося за допомогою пакету програм Micro-Cap 8. Живлення схеми здійснюється від джерел V2 – мінус 15В та V3+15В.

Як джерело сигналу, що імітує роботу піроприймача, використовується програмоване джерело V1. Для імітації наявності компонента, що вимірюється, запрограмуємо сигнал по змінному струму величиною 14 мВ і періодом 2,7 с (0,37 Гц). Для наочності роботи смугового фільтра підмішаємо в корисний сигнал піроприймача перешкоду з амплітудою напруги 7 мВ та частотою промислової мережі 50 Гц.

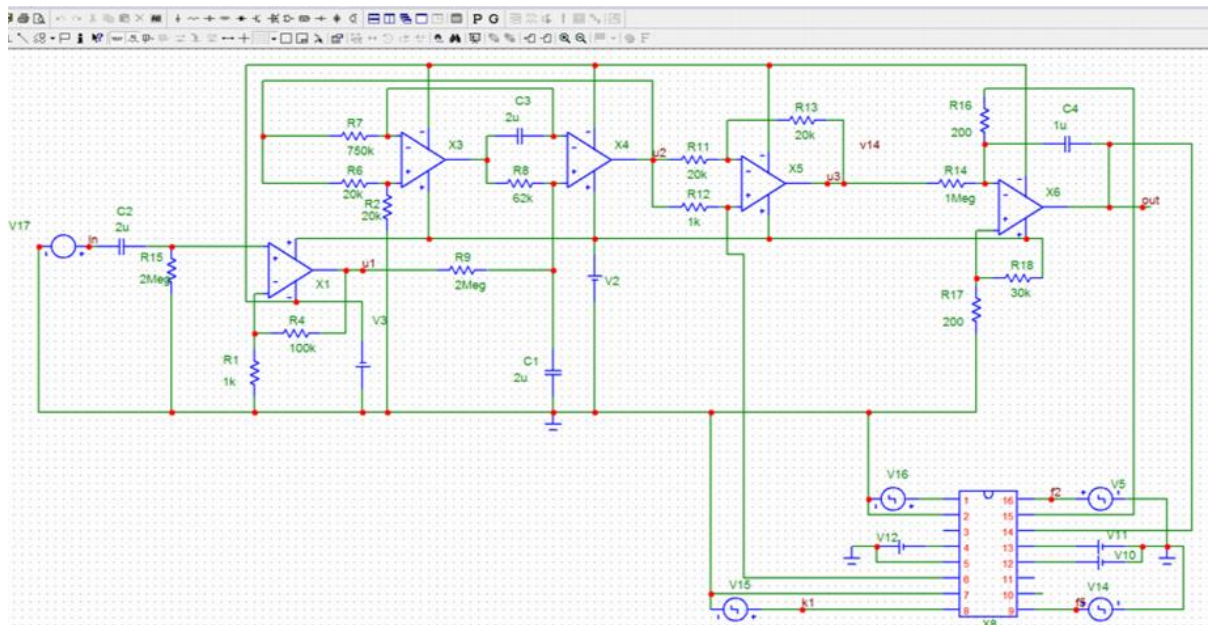


Рисунок 3.4 – Схема електрична принципова одного з каналів підсилення газоаналізатора у програмі Micro-Cap 8

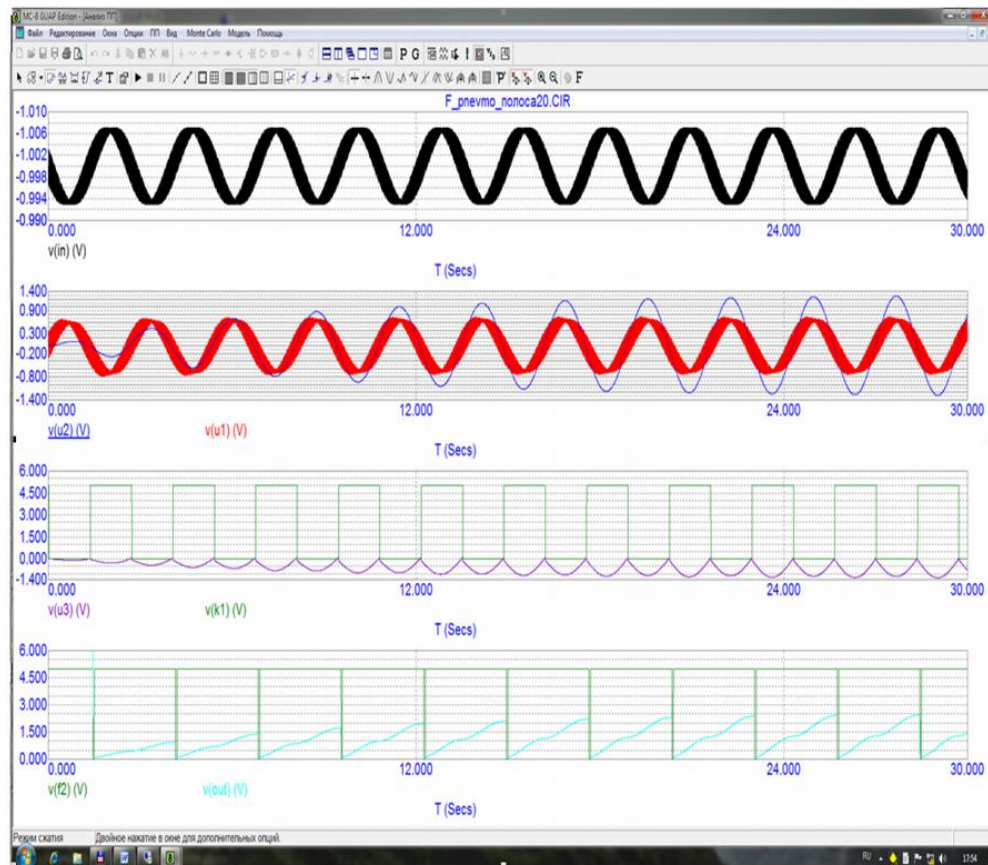


Рисунок 3.5 – Вікно результату розрахунку перехідного процесу роботи одного з каналів посилення за наявності вхідного сигналу, еквівалентного кінцю шкали вимірювання.

При включенні живлення піроприймача польовий транзистор повторювача піроприймача переходить в активний режим і на виході піроприймача встановлюється постійна напруга амплітудою мінус 1 В (чорний графік  $v(in)$  на рисунку 3.5).

На елементах C1, R1 зібраний ВЧ фільтр, що пропускає тільки змінну складову сигналу.

Основне підсилення сигналу відбувається на операційному підсилювачі X1. Коефіцієнт підсилення визначається опорамі R3 і R2 і становить 101. Графік напруги на виході першого каскаду посилення  $v(u1)$  наведено на рисунку 3.5.

На операційних підсилювачах X2 та X3 зібрано смуговий фільтр. Графік напруги на виході смугового фільтра  $v(u2)$  наведено на рисунку 3.5. На графіку  $v(u2)$  (вхід активного смугового фільтра рисунок 3.5) видно наявність

перешкоди частотою 50 Гц. На виході активного смугового фільтра сигналу видно посилення сигналу вдвічі і відсутність перешкоди 50 Гц.

Внаслідок використання однополярного АЦП у схемі наведеній на малюнку 3.4, необхідно перетворити змінний двополярний сигнал на однополярний, для можливості вимірювання.

Для цього за допомогою керованого випрямляча, зібраного на операційному підсилювачі Х4 та аналоговому ключі Х8, відбувається випрямлення сигналу негативної полярності (графік  $v(u3)$  на рисунку 3.5). Далі сигнал надходить на вхід інтегратора, зібраного на операційному підсилювачі Х6, який інтегрує сигнал площею, за період модуляції 2,7 с. (графік  $v(out)$  на рисунку 3.5).

Вимірювання сигналу на виході інтегратора відбувається в кінцевій точці інтегрування, після чого накопичувальна ємність інтегратора розряджається протягом 10 мс через обмежувальний резистор R14 за допомогою аналогового ключа Х8.

Управління аналоговими ключами Х8, що здійснюють випрямлення сигналу та розряд ємності інтегратора, відбувається за допомогою процесора за заданим алгоритмом (графіки  $v(k1)$  та  $v(f2)$  на рисунку 3.5).

Мікросхема Х8 має чотири канали комутації, тому здійснює обробку сигналу по всіх каналах вимірювання.

Для виключення зміщення вихідної напруги інтегратора в від'ємну область за наявності вхідної напруги зміщення операційного підсилювача інтегратора, позитивний вхід операційного підсилювача Х6 за допомогою резисторів R13, R15 попередньо зміщений на величину, явно велику допустимої напруги зміщення даного типу операційного підсилювача. Початкове зміщення, що вийшло, можна бачити на графіку  $v(out)$  рисунок 3.6 (представлені часові діаграми за відсутності сигналу з піроприймача).

На рисунку 3.7 подано розрахунок АЧХ схеми підсилення газоаналізатора. З розрахунку видно вузьку смугу пропускання за рівнем -3 дБ, що дорівнює 0,04 Гц на частоті 0,37 Гц.

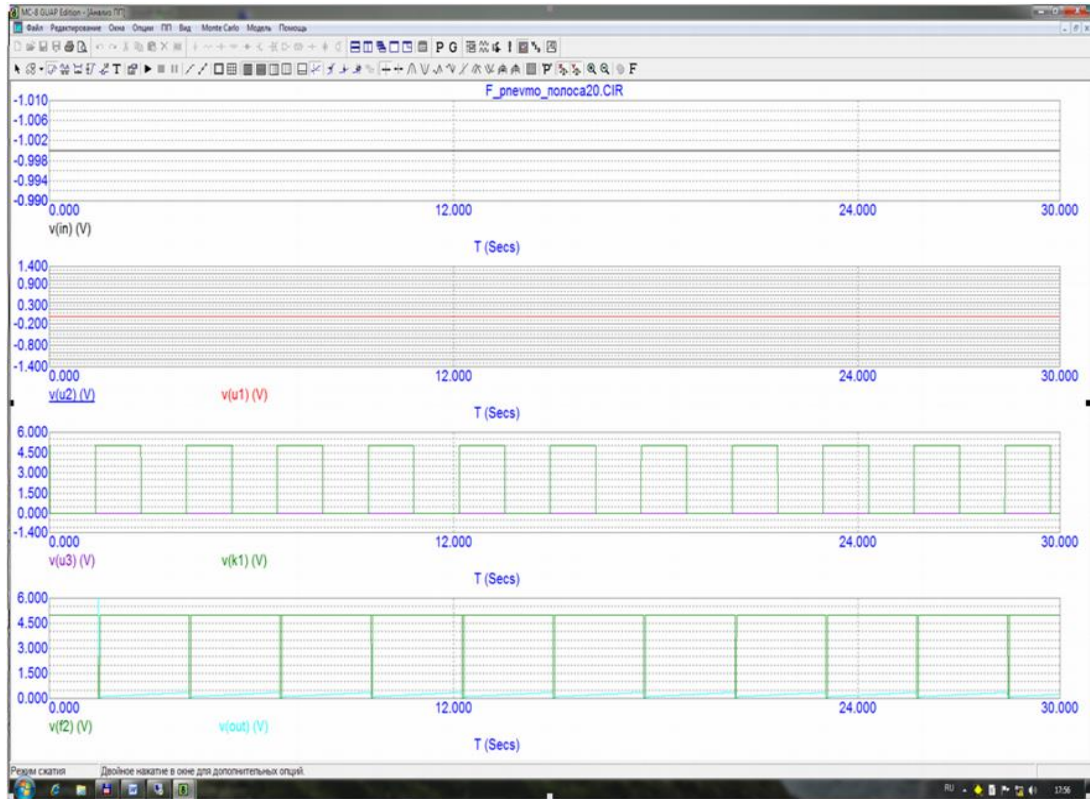


Рисунок 3.6 – Вікно результату розрахунку перехідного процесу одного з каналів підсилення за відсутності вхідного сигналу.

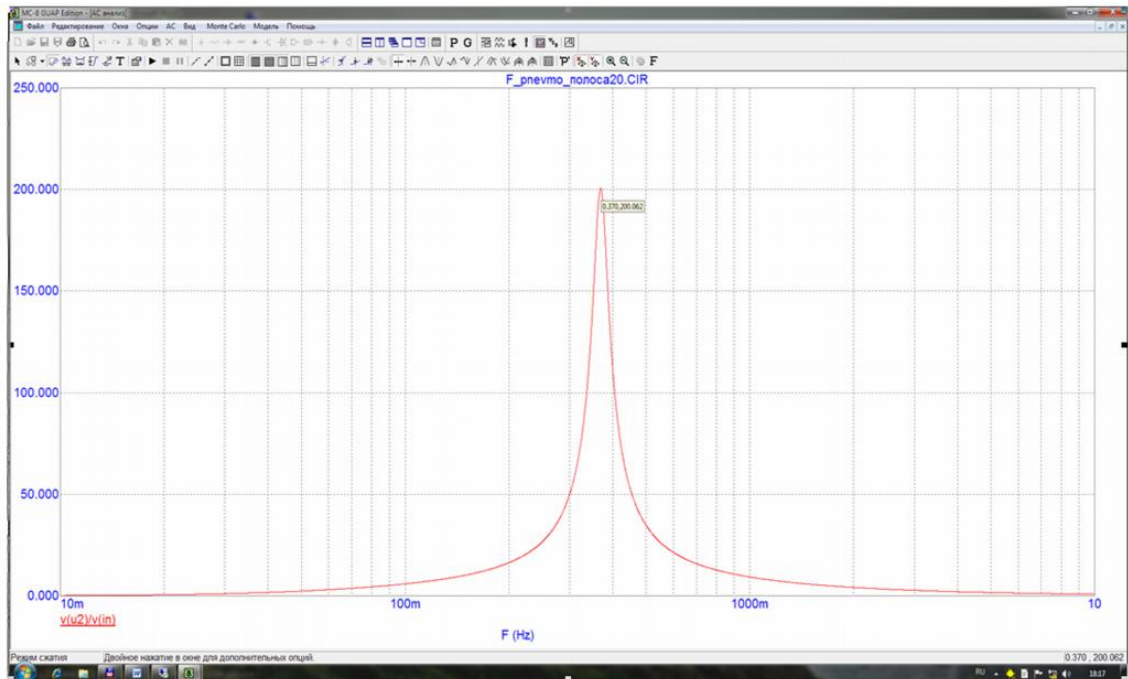


Рисунок 3.7 – Розрахована АЧХ схеми підсилення газоаналізатора.

### 3.3 Вибір та розрахунок електричної схеми блоку живлення газоаналізатора

Для живлення газоаналізатора застосовується схема, наведена на рисунку 3.8. Як напруга живлення газоаналізатора може використовуватися постійна напруга 24 В, або змінна напруга 127 В або 220 В частотою 50 Гц.

Для перетворення змінної напруги на постійну застосовується двофазний одноктний випрямляч (рисунок 3.8, поз.1) [22]. У цьому випадку використовуються дві вторинні обмотки, включені протифазно. Протягом одного періоду мережі через кожну з них протікає один імпульс струму  $i_2$  і  $i_2''$ .

Завдяки діодам VD1, VD2 ці струми протікають через навантаження в одному напрямку, а через вторинні обмотки через протифазне включення – у різних напрямках. В результаті форма струму в первинній обмотці не спотворюється і в осерді трансформатора не проводиться підмагнічування постійним струмом. Часові діаграми струмів та напруг двофазного одноктного випрямляча наведено на рисунку 3.9.

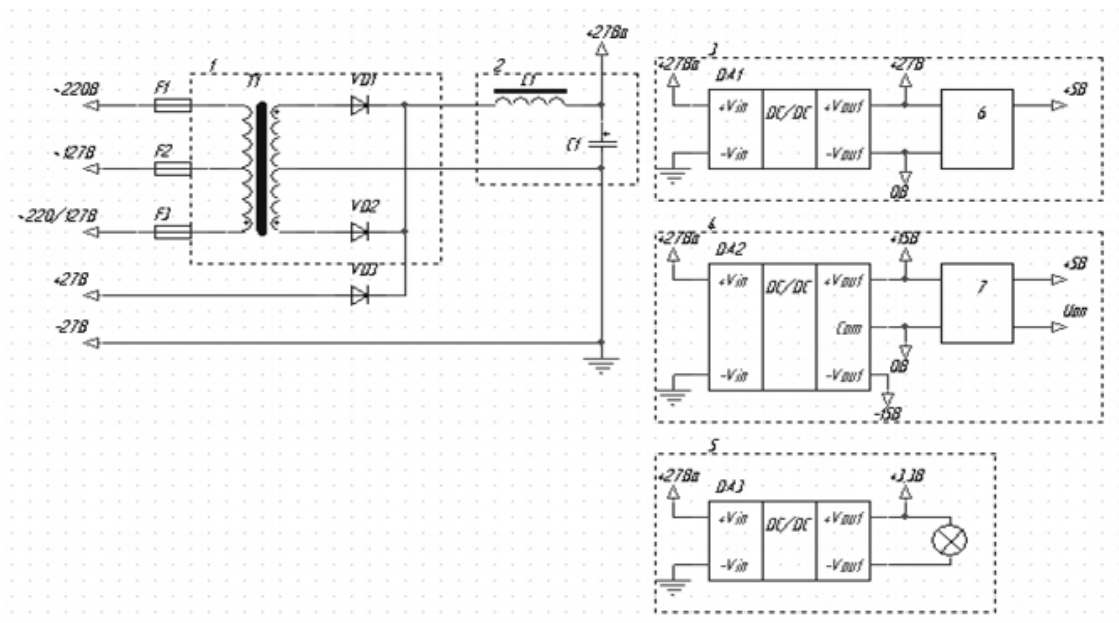


Рисунок 3.8 – Схема електрична живлення проектованого газоаналізатора.

Як фільтр будемо застосовувати згладжуючий Г-подібний LC-фільтр нижніх частот [22]. Дросель (L1) має великий опір змінного струму і малий опір постійному струму. В результаті напруга пульсацій, що є на виході випрямляча, перерозподіляється таким чином, що основна його частина падає на дроселі (L1) і менша – на конденсаторі (C1). У той же час через малий опір дроселя (L1) постійному струму напруга на виході фільтра мало відрізнятиметься від напруги на виході випрямляча. На рисунку 3.10 представлена АЧХ Г-подібного LC-фільтр нижніх частот.

Розрахунок фільтра провадиться за формулою:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.5)$$

де:  $f$  - частота зрізу (рисунок 3.10);  $L$  – значення індуктивності фільтра;  $C$  – значення ємності фільтра.

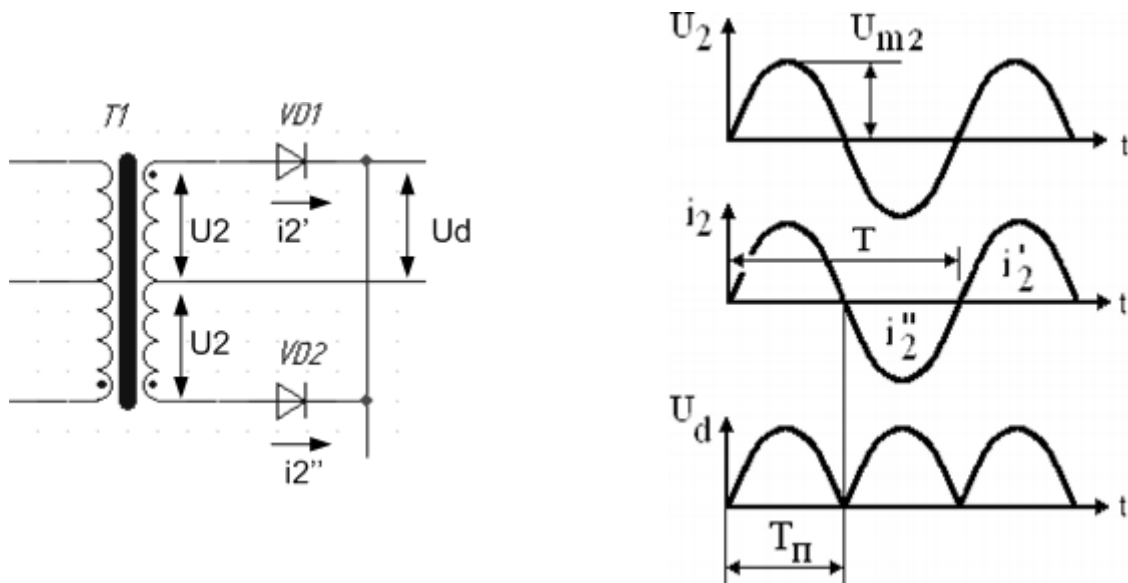


Рисунок 3.9 – Часові діаграми струмів та напруг двофазного однофазного випрямляча

Розрахуємо фільтр для частоти зрізу 20 Гц, як дросель L1 використовуватимемо дросель з номінальним значенням індуктивності номіналом 20 мГн.

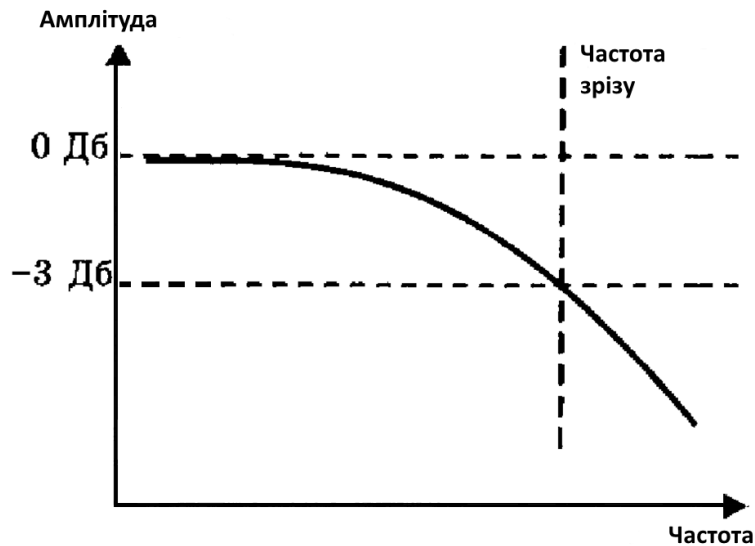


Рисунок 3.10 - АЧХ Г-подібного LC фільтра нижніх частот.

Використовуючи формулу 3.33, визначимо значення ємності конденсатора  $C1$ :

$$C1 = \frac{1}{20 \cdot 10^{-3} \cdot (3,14159 \cdot 20)^2} = 0,012(\Phi)$$

На основі розрахунків будемо використовувати електролітичний конденсатор ємністю 15000 мкФ як найбільш близький до розрахованого. Для підібраних компонентів фільтра дроселя  $L1$  та конденсатора  $C1$  частота зрізу фільтра дорівнює 184 Гц.

В результаті ми отримуємо малощумливий перетворювач змінної напруги в постійну, що не вимагає застосування дорогих електронних компонентів.

Сформована напруга живлення після фільтра надходить на входи модулів живлення DA1, DA2, DA3 (рисунок 3.8).

Модуль живлення DA3 застосовується для формування напруги 3,3, яка використовується для живлення випромінювача.

Модуль живлення DA1 застосовується для стабілізації напруги 24 В. Стабілізована напруга 24 В використовується для живлення насосів витрат і клапанів БПП.

Для отримання напруги живлення цифрових компонентів застосовується схема, наведена на рисунку 3.11.

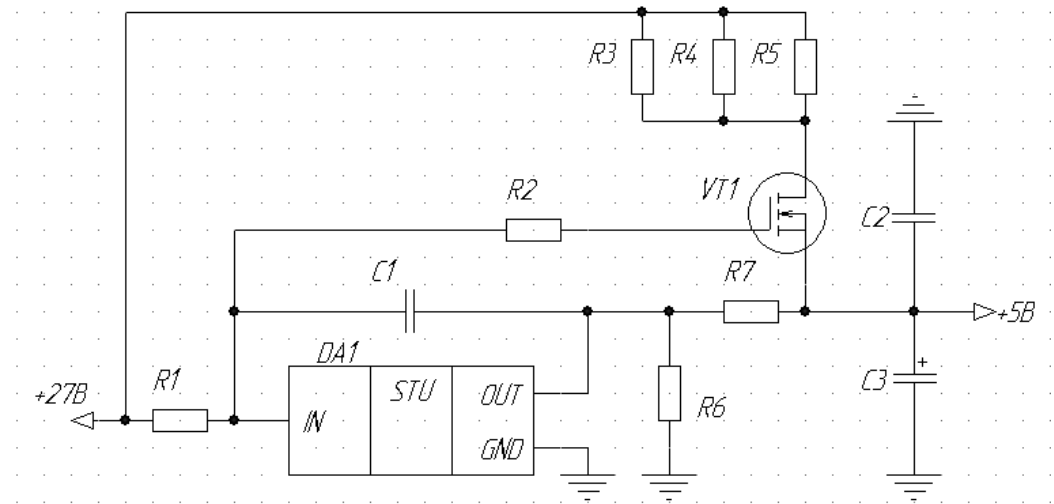


Рисунок 3.11 – Схема формування живлення цифрових компонентів БУ

Основним елементом схеми є мікросхема Н142ЕН19, яка використовується як джерело опорної напруги.

Мікросхема Н142ЕН19 являє собою регульований паралельний стабілізатор напруги – інтегральний аналог стабілітрону, але на відміну від стабілітрону, мікросхема Н142ЕН19 здатна формувати регульовану зразкову напругу, у тому числі меншу, ніж у низьковольтних стабілітронів, причому вони має кращі стабілітрони.

Мікросхема Н142ЕН19 виготовлена за планарно-епітаксіальною технологією з ізольованим р-п переходом, на рисунку 3.12 наведена спрощена структурна схема мікросхеми Н142ЕН19.

Мікросхема Н142ЕН19 містить внутрішнє джерело опорної напруги, що визначає її мінімальну вихідну напругу. Мікросхема Н142ЕН19 зберігає працездатність та забезпечує задані параметри при напрузі на виводі 1 (катоді) не нижче, ніж на виводі 3 (керівнику). Завдяки внутрішньому підсилювачу мікросхема Н142ЕН19 має диференціальний опір менше 0,5 Ом при струмах катода від 1 до 100 мА.

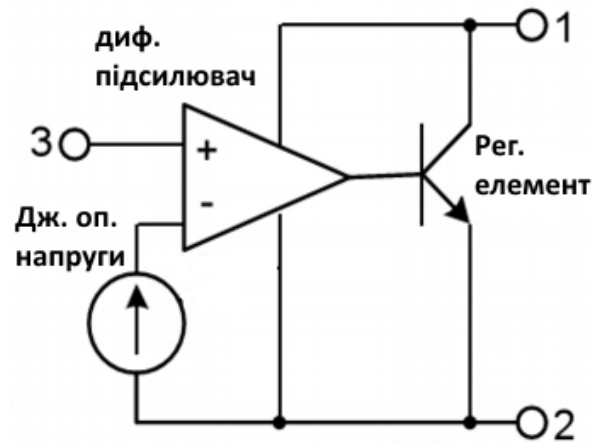


Рисунок 3.12 – Структурна схема мікросхеми H142EN19

Модуль живлення DA2 застосовується для формування напруги  $\pm 15$  Ст.

Для отримання опорної напруги та напруги живлення цифрових компонентів (+5 В) застосовується схема, наведена на малюнку 3.13.

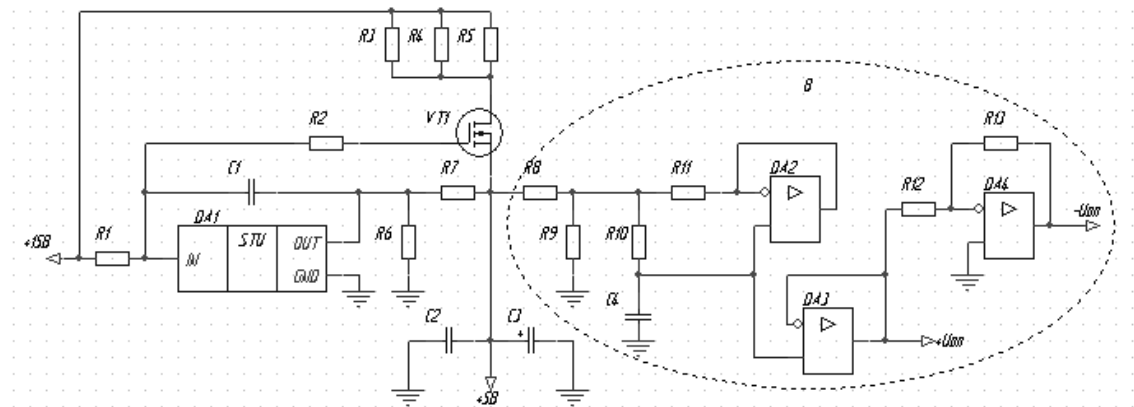


Рисунок 3.13 – Схема електрична формування живлення компонентів.

Для формування напруги з низьким рівнем шуму  $\pm U_{оп}$  для живлення піроприймачів застосовуємо схему на рисунку 3.13 з використанням помножувача ємності.

На операційному підсилювачі DA2 зібрано повторювач. Напряга на виході операційного підсилювача DA2 у цій схемі дорівнює напрузі на його неінвертуючому вході, тобто на конденсаторі. Вхідний струм розподіляється між конденсатором C4 та операційним підсилювачем DA2 пропорційно опорам резисторів R11 та R10. Конденсатор C4 заряджається не всім вхідним струмом, а тільки його частиною, тому напруга на конденсаторі C4, а значить на виході

схеми, зростає повільніше, а отже, схема еквівалентна конденсатору великої ємності.

Ємність, одержувана за допомогою даної схеми, розраховується за такою формулою:

$$C_e = C_4 \frac{R_{10}}{R_{11}}, \quad (3.6)$$

Внутрішній опір ємнісного помножувача чисельно дорівнює опору резистора R11. Зменшувати опір цього резистора небажано - вихід операційного підсилювача малопотужний і вихідний струм повинен не перевищувати 20 мА, використовуватимемо R11=300 Ом. Для отримання ємності 1000 мкФ, візьмемо конденсатор C4=1,5 мкФ, розрахуємо необхідне значення опору резистор R10:

$$R_{10} = R_{11} \frac{C_e}{C_4}. \quad (3.7)$$

$$R_{10} = 300 \frac{1000 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 200 \text{ кОм}$$

При отриманих номіналах частоту зрізу RC фільтра розрахуємо за формулою:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{2 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}} = 0,011 \text{ Гц}$$

Фільтр послаблюватиме перешкоди з частотою більшою за частоту зрізу. Розраховане значення частоти зрізу дорівнює 0,011 Гц дозволяє гарантувати повне придушити будь-які перешкоди, поява якої можлива в несприятливій електромагнітній обстановці.

## 4 МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИСТРОЮ

### 4.1 Методика проведення метрологічних досліджень

Для виконання калібрування і перевірки розробленого пристрою слід використати балони з перевірочними газовими сумішами які містять різні концентрації фреонів, для проведення випробувань (перевірок) подано в таблиці 4.1.

Значення концентрації визначеного компонента ( $C_j$ ) в точці, що перевіряється,  $\text{мг/м}^3$ , фіксувалося візуально на індикаторі газоаналізатора: Значення відносної похибки газоаналізатора в точці, що перевіряється ( $\delta$ ), %, визначалося за формулою:

$$\delta = \frac{C_j - C_0}{C_0} \cdot 100\% , \quad (4.1)$$

де  $C_0$  – дійсне значення концентрації визначеного компонента в точці, що перевіряється,  $\text{мг/м}^3$ .

Таблиця 4.1 – Перелік балонів із сумішами які застосовувалися для проведення випробувань

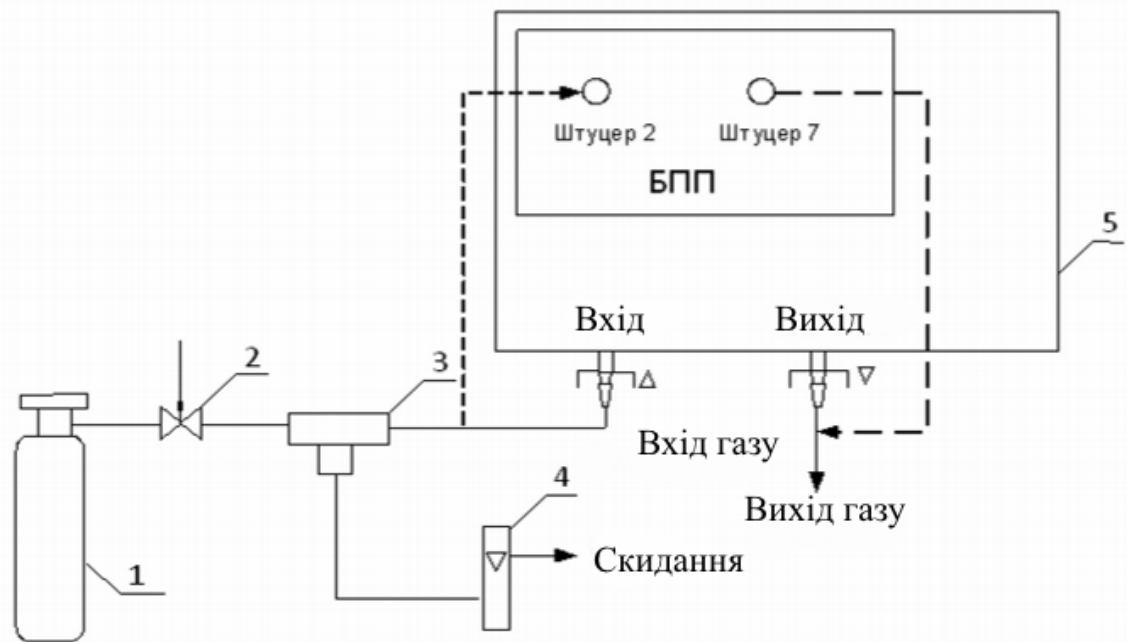
№ суміші	Компонентний склад суміші	Одиниця фізичної величини	Характеристики суміші газу	
			Концентрація компонента	Межі відхилення відн. %
1	Фреон 114В2- повітря	$\text{мг/м}^3$	350	$\pm 10$
2			3500	$\pm 10$
3	Фреон 22- азот	$\text{мг/м}^3$	150	$\pm 10$
4			3500	$\pm 5$

Значення абсолютної похибки газоаналізатора в точці, що перевіряється ( $\Delta$ ),  $\text{мг/м}^3$ , визначалося за формулою:

$$\Delta = C_j - C_0 , \quad (4.2)$$

Випробування газоаналізатора проводилися за газовою схемою, представленою на рисунку 4.1. Витрата газової суміші, встановлювалася ( $0,6 \pm 0,1$ ) л/хв.

Відлік показань газоаналізатора проводився через 10 хвилин після початку подачі газової суміші. Вимірювання концентрації фреону 114В2 проводилися каналом 1 газоаналізатора, а фреону 22 – каналом 2.



1 - балон із газовою сумішшю; 2 - вентиль точного регулювання; 3 - трійник (скляний або з нержавіючої сталі); 4 – ротаметр; 5 - газоаналізатор

Рисунок 4.1 – Схема для перевірки газоаналізатора із газовими сумішами

Перерахунок концентрації визначеного компонента ( $C_0$ ), вираженої в об'ємних частках,  $\text{млн}^{-1}$ , масової концентрації,  $\text{мг/м}^3$ , проводився за формулою

$$C_0 = \frac{C_o \cdot M \cdot P \cdot 293}{22,41T \cdot 760}, \quad (4.3)$$

де  $C_0$  - об'ємна частка визначеного компонента, газової суміші,  $\text{млн}^{-1}$ ;  $P$  – атмосферний тиск, мм рт. ст.; 22,41 – об'єм 1 г·моль газу при температурі  $0^\circ\text{C}$  тиску 1 атм.,  $\text{дм}^3$ ;  $M$  - молекулярна маса компонента, що визначається, г/моль:  $M$  (фреону 114В2) = 260;  $M$  (фреону 22) = 86,5;  $T$  – значення температури навколишнього середовища, К.

Перерахунок концентрації визначеного компонента ( $C_0$ ), вираженої в об'ємних частках, %, масової концентрації, мг/м<sup>3</sup>, проводився за формулою:

$$C_0 = \frac{C'_0 \cdot M \cdot P \cdot 293 \cdot 10^4}{22,41T \cdot 760}, \quad (4.4)$$

де  $C'_0$  - об'ємна частка визначеного компонента, газової суміші, %.

#### 4.2 Визначення основної похибки, що допускається

Визначення похибки, що допускається, і перевірка діапазону вимірювань газоаналізатора проводилися при почерговому пропусканні газових сумішей 1-2-3-2-1-4-4-1. У кожній точці перевірки фіксувалося значення концентрації визначеного компонента ( $C_j$ ) за індикатором газоаналізатора, обчислювалося значення відносної похибки ( $\delta$ ) за формулою 4.1 та значення абсолютної похибки ( $\Delta$ ) за формулою 4.2. Результати випробувань подано у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати випробування газоаналізатора щодо основної похибки

№ суміші	Значення концентрації визначуваного компонента, мг/м <sup>3</sup>	Вимірне значення концентрації визначуваного компонента, мг/м <sup>3</sup>	Значення похибки вимірювання
1	Канал 1: (0,0 ± 25,0)	2,2	$\Delta = 2,2$ мг/м <sup>3</sup>
	Канал 2: (0,0 ± 25,0)	3,6	$\Delta = 3,6$ мг/м <sup>3</sup>
2	Канал 1: (350,0 ± 87,5)	365,0	$\delta = 4,7$ %
	Канал 2: (0,0 ± 25,0)	4,1	$\Delta = 4,1$ мг/м <sup>3</sup>
3	Канал 1: (3500,0 ± 875)	3378,0	$\delta = 3,5$ %
	Канал 2: (0,0 ± 25,0)	3,3	$\Delta = 3,3$ мг/м <sup>3</sup>
4	Канал 1: (0,0 ± 25,0)	1,1	$\Delta = 1,1$ мг/м <sup>3</sup>
	Канал 2: (150,0 ± 37,5)	144,0	$\delta = 4,5$ %

### 4.3 Випробування впливу підвищеної температури середовища

Випробування газоаналізатора на вплив підвищеної температури навколишнього середовища проводилося на сумішах газу №1, №2, №4 у наступній послідовності: 1) газоаналізатор у вимкненому стані встановлювався в камеру в якій можна змінювати температуру, при цьому балони з газовими сумішами та вимірювальна апаратура містилася поза камерою.

Довжина та робочий об'єм газопідвідних трубопроводів вибиралися такої величини, щоб було достатньо для повного вирівнювання значень температур газових сумішей, що надходять в газоаналізатор, та повітря в робочому об'ємі камери (довжина близько 3 м).

2) в камері встановлювалася температура  $(20 \pm 2)$  °С на час 6 год. Після цього вмикалася напруга живлення газоаналізатора і витримувався час прогріву 15 хв. Далі подавалися газові суміші №1, №2, №4 по 10 хв кожна і фіксувалися покази газоаналізатора по індикатору для каналу 1 і 2 каналу;

3) газоаналізатор вимикався;

4) у камері встановлювалася температура  $(48 \pm 2)$  °С, газоаналізатор витримувався у вимкненому стані при підвищеній робочій температурі 6 год.

Після цього включалася напруга живлення газоаналізатора і витримувався час прогріву 15 хв. Далі подавалися газові суміші №1, №2, №4 по 10 хв кожна і фіксувалися показання газоаналізатора по індикатору для каналу 1 і каналу 2;

5) газоаналізатор вимикався;

6) температура в камері підвищувалася до  $(68 \pm 2)$  °С (гранична підвищена температура), газоаналізатор витримувався у вимкненому стані при підвищеній граничній температурі протягом 6 год;

7) температура в камері знижувалася до робочої підвищеної температури  $(48 \pm 2)$  °С, газоаналізатор витримувався при цій температурі протягом 6 годин. Далі подавалися газові суміші №1, №2, №4 по 10 хв кожна і фіксувалися показання газоаналізатора по індикатору для каналу 1 і 2 каналу;

8) температура в камері знижувалася до температури  $(20 \pm 2)$  °С, газоаналізатор витримувався при цій температурі протягом 6 годин. Далі

подавалися газові суміші №1, №2, №4 по 10 хв кожна і фіксувалися показання газоаналізатора по індикатору для каналу 1 і каналу 2.

В умовах впливу кожної з температур визначалося значення концентрації визначається компонента ( $C_0$ ) у точці, що перевіряється за формулою 4.3, фіксувалося значення концентрації визначається компонента ( $C_j$ ) по індикатору газоаналізатора, обчислювалося значення відносної похибки ( $\delta$ ) за формулою 4.1 та значення абсолютної похибки ( $\Delta$ ), за формулою 4.2.

Таблиця 4.3 – Результати випробування газоаналізатора на стійкість під впливом підвищеної температури

№ суміші (температура в камері, ° C)	Значення концентрації визначуваного компонента, мг/м <sup>3</sup>	Вимірне значення концентрації визначуваного компонента, мг/м <sup>3</sup>	Значення похибки вимірювання
№1 (20 ± 2)	Канал 1: (0,0 ± 25,0) Канал 2: (0,0 ± 25,0)	6,1 4,8	$\Delta = 6,1 \text{ мг/м}^3$ $\Delta = 4,8 \text{ мг/м}^3$
№2 (20 ± 2)	Канал 1:(350,0± 87,5) Канал 2: (0,0 ± 25,0)	362,0 - 2,4	$\delta = 3,5 \%$ $\Delta = - 2,4 \text{ мг/м}^3$
№4 (20 ± 2)	Канал 1: (0,0 ± 25,0) Канал 2:(150,0± 37,5)	- 1,8 142,1	$\Delta = - 1,8 \text{ мг/м}^3$ $\delta = 5,3 \%$
№1 (48 ± 2)	Канал 1: (0,0 ± 25,0) Канал 2: (0,0 ± 25,0)	4,2 5,0	$\Delta = 4,2 \text{ мг/м}^3$ $\Delta = 5,0 \text{ мг/м}^3$
№4 (48 ± 2)	Канал 1:(318,5± 79,6) Канал 2:(0,0 ± 25,0)	325,2 - 3,5	$\delta = 2,1 \%$ $\Delta = - 3,5 \text{ мг/м}^3$
№1 (20 ± 2)	Канал 1: (0,0 ± 25,0) Канал 2: (0,0 ± 25,0)	6,5 3,9	$\Delta = 6,5 \text{ мг/м}^3$ $\Delta = 3,9 \text{ мг/м}^3$
№2 (20 ± 2)	Канал 1:(350,0± 87,5) Канал 2: (0,0 ± 25,0)	368,2 - 2,1	$\delta = 5,2 \%$ $\Delta = - 2,1 \text{ мг/м}^3$
№4 (20 ± 2)	Канал 1: (0,0 ± 25,0) Канал 2:(150,0± 37,5)	- 1,8 145,2	$\Delta = - 1,8 \text{ мг/м}^3$ $\delta = 3,2 \%$

## Висновки

Розроблено модель інфрачервоного випромінювача, що дозволяє отримати заданий максимум спектральної щільності енергетичної світності шляхом вибору матеріалу випромінюючого елемента та його товщини. Отримання заданого максимуму світності особливо актуальне під час роботи в області спектру від 6-7 мкм і вище, і може знайти подальше використання при проведенні досліджень у цій галузі. Розраховано та розроблено модель інфрачервоного випромінювача, що використовується як випромінювальний елемент.

У роботі запропоновано та досліджено метод модуляції щільності оптичного середовища в робочій камері, що дозволяє усунути вплив зовнішніх факторів, що впливають на показання газоаналізатора і дозволяють підвищити точність.

Результати метрологічних випробувань підтвердили відповідність розробленого газоаналізатора вимогам контролю забруднення житлової та робочої зон, а також значну перевагу метрологічних характеристик щодо промислово доступних аналогів.

### Список використаних джерел

1. J. Unwin, P.T. Walsh, An exposure monitor for chlorinated hydrocarbons based on conductometry using lead phthalocyanne films, *Sensors and Actuators*, Volume 18, Issue 1, 1 June 1989, Pages 45-57.
2. H. Komiya, S. Kimura Freon and halogenated hydrocarbon detection with electrochemical sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 1, Issues 1–6, January 1990, Pages 68-72.
3. F. B. Aleksandr, S. Achim, V. Joachim, M. M. Rapp, Selective Detection of HFC and HCFC Refrigerants Using a Surface Acoustic Wave Sensor System, *Analytical Chemistry*, Vol 75, Issue 19, 2023. Pages 40-65.
4. J. W. Yoo, S. B. Hong, M. S. Kim, Refrigerant leakage detection in an EEV installed residential air conditioner with limited sensor installations. *International Journal of Refrigeration*, 78, 2017, P.157-165.
5. S.A. Tassou, I.N. Grace Fault diagnosis and refrigerant leak detection in vapour compression refrigeration systems, *International Journal of Refrigeration*, Volume 28, Issue 5, August 2005, Pages 680-688.
6. Yong Hwan Eom, Jin Woo Yoo, Sung Bin Hong, Min Soo Kim, Refrigerant charge fault detection method of air source heat pump system using convolutional neural network for energy saving, *Energy*, Volume 187, 15 November 2019, 115877.
7. H. Han, B. Gu, T. Wang, Z.R. Li, Important sensors for chiller fault detection and diagnosis (FDD) from the perspective of feature selection and machine learning, *International Journal of Refrigeration* Volume 34, Issue 2, March 2011, Pages 586-599.
8. J. Liang, R. Du, Model-based Fault Detection and Diagnosis of HVAC systems using Support Vector Machine method, *International Journal of Refrigeration*, Volume 30, Issue 6, September 2007, Pages 1104-1114
9. A. Rogalski, *Infrared Detectors*, Gordon and Breach, Amsterdam 2000.
10. A. Hoffman, Semiconductor processing technology improves resolution of infrared arrays, *Laser Focus World*, 2006, 81.

11. A.W. Hoffman, P.L. Love, J.P. Mega-pixel detector arrays: Visible to 28  $\mu\text{m}$ , *Rosbeck, Proc. SPIE* 5167, 194 (2004).
12. J.W. Beletic, R. Blank, D. Gulbransen, D. Lee, M. Loose, E.C. Piquette, T. Sprafke, W.E. Tennant, M. Zandian, J. Zino, Teledyne Imaging Sensors: infrared imaging technologies for astronomy and civil space, *Proc. SPIE* 7021, 70210H (2008).
13. P. Norton, J. Campbell, S. Horn, D. Reago, Third-generation infrared imagers, *Proc. SPIE* 4130, 226 (2000).
14. M.Z. Tidrow, W.A. Beck, W.W. Clark, H.K. Pollehn, J.W. Little, N.K. Dhar, P.R. Leavitt, S.W. Kennedy, D.W. Beekman, A.C. Goldberg, W.R. Dyer, New material systems for third generation infrared photodetectors, *Opto Electron. Rev.* 7, 283 (1999).
15. M.N. Abedin, T.F. Refaat, I. Bhat, Y. Xiao, S. Bandara, S.D. Gunapala, Progress of multicolor single detector to detector array development for remote sensing, *Proc. SPIE* 5543, 239 (2004).
16. R.A. Smith, F.E. Jones and R.P. Chasmar, *The Detection and Measurement of Infrared Radiation*. Clarendon, Oxford, 1958.
17. J.T. Caulfield, in: *Proc. 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop*, IEEE 2003, p. 7.
18. D. Reago, S. Horn, J. Campbell, R. Competitive technologies of third generation infrared photon detectors, *Vollmerhausen, Proc. SPIE* 3701, 108 (1999).
19. P. Norton, J. Campbell, S. Horn, D. Reago, Third-generation infrared imagers, *Proc. SPIE* 4130, 226 (2000).
20. P.R. Norton, Third-generation sensors for night vision, *Opto-Electron. Rev.* 14, 283 (2006).
21. A. Rogalski, J. Antoszewski, L. Faraone, Development of IR detectors, *J. Appl. Phys.* 105, 091101 (2009).
22. L.M. Biberman and R.L. Sendall, Chapter 1. Introduction: A brief history of imaging devices for night vision, in: *Electro-Optical Imaging: System Performance and Modeling*, edited by L.M. Biberman. SPIE Press, Bellingham, p. 126 (2000).

23. R.A. Smith, F.E. Jones and R.P. Chasmar, *The Detection and Measurement of Infrared Radiation*, Clarendon, Oxford, 1958.
24. E.S. Barr, “Historical survey of the early development of the infrared spectral region”, *Amer. J. Phys.* 28, 42–54 (1960).
25. P. Norton, “Detector focal plane array technology”, in *Encyclopedia of Optical Engineering*, edited by R. Driggers, pp. 320–348, Marcel Dekker Inc., New York, 2003.
26. A. Rogalski and P. Martyniuk, “InAs/GaInSb superlattices as a promising material system for third generation infrared detectors”, *Infrared Phys. Technol.* 48, 39–52 (2006).
27. J. Szafraniec, S. Tsao, W. Zhang, H. Lim, M. Taguchi, A.A. Quivy, B. Movaghar, and M. Razeghi, “High-detectivity quantum-dot infrared photodetectors grown by metalorganic chemical-vapor deposition”, *Appl. Phys. Lett.* 88, 121102 (2006).
28. E.-T. Kim, A. Madhukar, Z. Ye, and J.C. Campbell, “High detectivity InAs quantum dot infrared photodetectors”, *Appl. Phys. Lett.* 84, 3277–3279 (2004).
29. R.S. Attaluri, S. Annamalai, K.T. Posani, A. Stintz, and S. Krishna, “Influence of Si doping on the performance of quantum dots-in-well photodetectors”, *J. Vac. Sci. Technol.* B24, 1553–1555 (2006).
30. S. Chakrabarti, A.D. Stiff-Roberts, X.H. Su, P. Bhattacharya, G. Ariyawansa, and A.G.U. Perera, “High-performance mid-infrared quantum dot infrared photodetectors”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38, 2135–2141 (2005).
31. S. Krishna, D. Forman, S. Annamalai, P. Dowd, P. Varangis, T. Tumolillo, A. Gray, J. Zilko, K. Sun, M. Liu, J. Campbell, and D. Carothers, “Two-color focal plane arrays based on self assembled quantum dots in a well heterostructure”, *Phys. Stat. Sol. (c)* 3, 439–443 (2006).