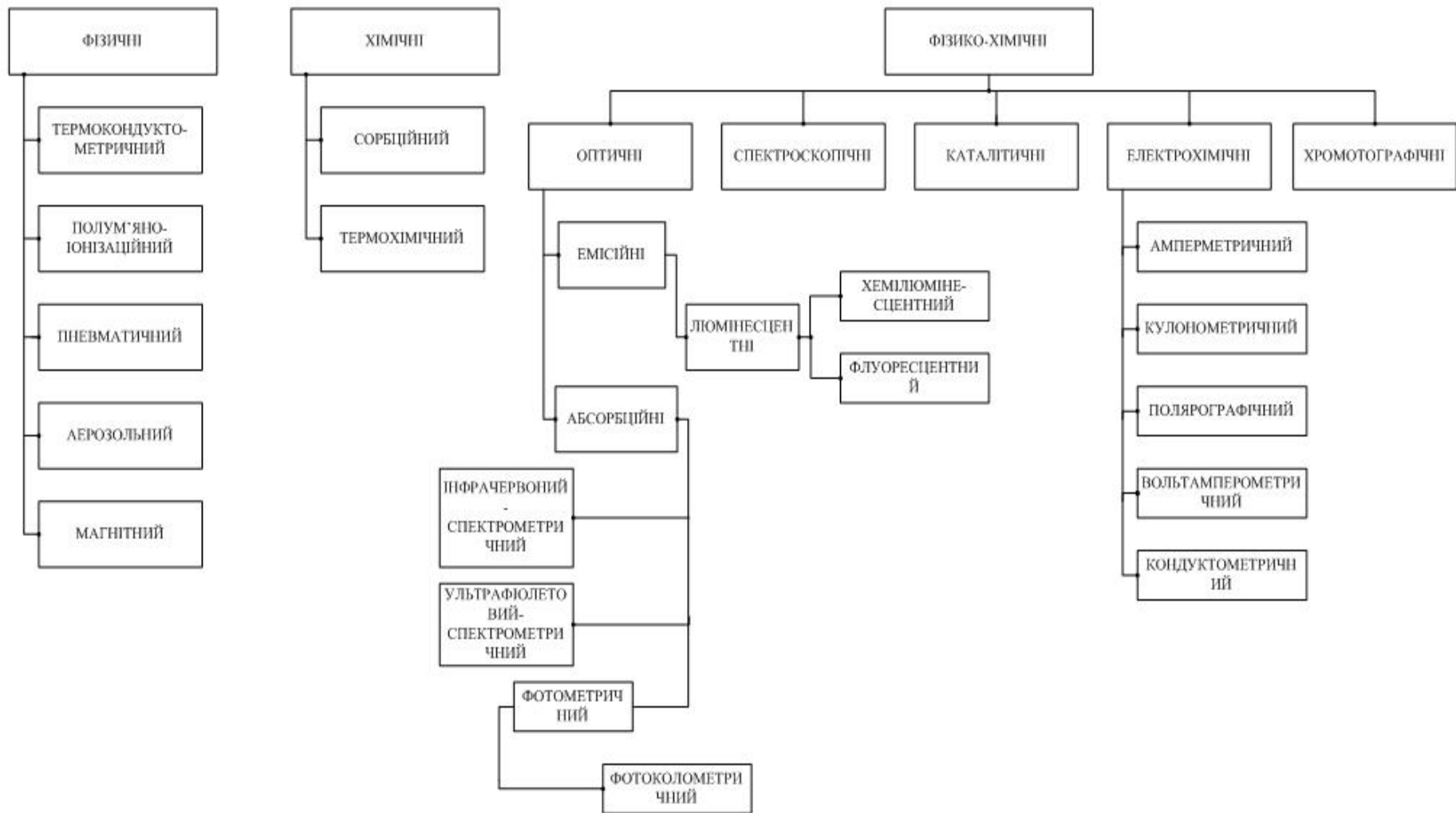


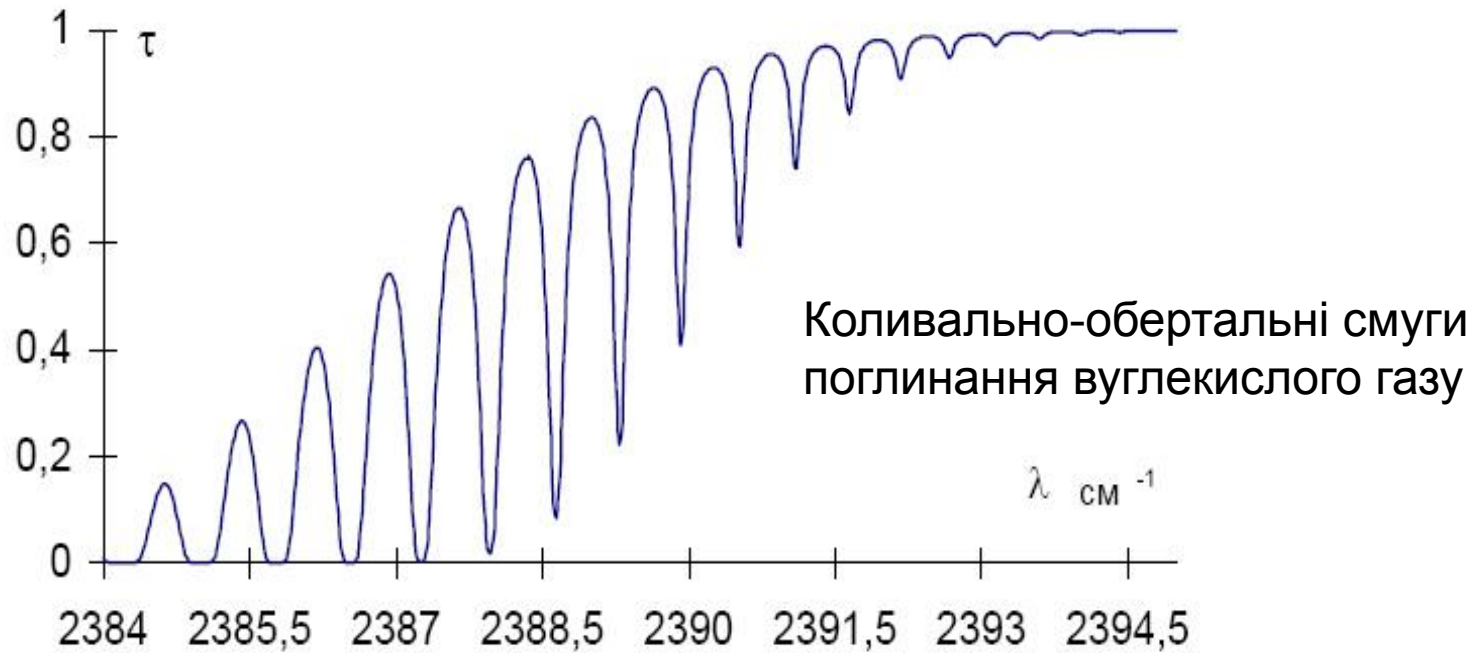
**“Засіб контролю СО(IV) на основі
оптико-абсорційного методу”**

***доповідач: Баранець Василь Вікторович
науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Дудадтьєв І.А.***

- **Мета дослідження.** Метою роботи є підвищення достовірності при необхідній швидкодії процесу контролю концентрації двоокису вуглецю за рахунок оцінення та компенсації впливу впливних факторів на основі оптико-абсорбційного методу.
- Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені такі **задачі:**
- аналіз існуючих засобів та методів контролю концентрації двоокису вуглецю;
- розробка математичної моделі засобу для контролю двоокису вуглецю на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу;
- розробка структурної схеми засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у повітрі;
- розробка програмного засобу для автоматичного контролю концентрації двоокису вуглецю;
- проведення експериментальних досліджень та підтвердження адекватності розробленого засобу контролю концентрації двоокису вуглецю.
- *Об'єктом дослідження* МКР є процес вимірювального контролю концентрації двоокису вуглецю.
- *Предметом дослідження* є методи та засоби підвищення достовірності контролю при заданій швидкодії оптико-абсорбційного методу контролю концентрації двоокису вуглецю.
- **Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач у роботі були використані методи теорії вимірювального контролю, теорії планування наукового експерименту в ході експериментальних досліджень, комп'ютерного моделювання, теорії вимірювань, похибок вимірювань та технічного контролю. теорії вимірювань, методи алгоритмізації та програмування для розроблення програмної частини засобу вимірювального контролю.
- **Наукова новизна одержаних результатів:**
- 1. Одержав розвиток метод вимірювального контролю концентрації двоокису вуглецю в основній інфрачервоній області з відкритими вимірювальним та компенсаційним каналами, що дозволило зменшити похибку вимірювання до значення менше 1% у діапазоні вимірювання та зменшити кількість контрольованих параметрів (вологість, запиленість).
- 2. Розроблена структурно-алгоритмічна організація системи контролю концентрації двоокису вуглецю на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу.
- 3. Вдосконалено математичну модель фотоелектричного вимірювального перетворювача концентрації двоокису вуглецю, яка враховує паразитні параметри складових елементів фотоприймача та пов'язує вихідну величину – значення вихідної напруги фотоприймача та вхідну – значення інтенсивності світлового потоку, і, як наслідок, концентрацію двоокису вуглецю, що дозволило підвищити точність вимірювання у 1,1-1,2 рази.
- **Практичне значення одержаних результатів.** У роботі отримані такі практичні результати:
- 1. Розроблена структурно-алгоритмічна організація засобу контролю концентрації двоокису вуглецю на основі оптико-абсорбційного методу, яка враховує вплив впливних факторів та адаптаційні алгоритми функціонування його в реальних умовах.
- 2. Розроблений програмний засіб для автоматичного контролю концентрації двоокису вуглецю. Програму контролю концентрації двоокису вуглецю написано у програмному пакеті WinPLC7 на мові програмування STL.
- 3. Розроблений та досліджений експериментальний зразок засобу контролю концентрації двоокису вуглецю, який має перехідний процес на рівні 0,44 с при максимальній відносній похибці 0,92%.

Систематизація методів контролю концентрації оксиду карбону



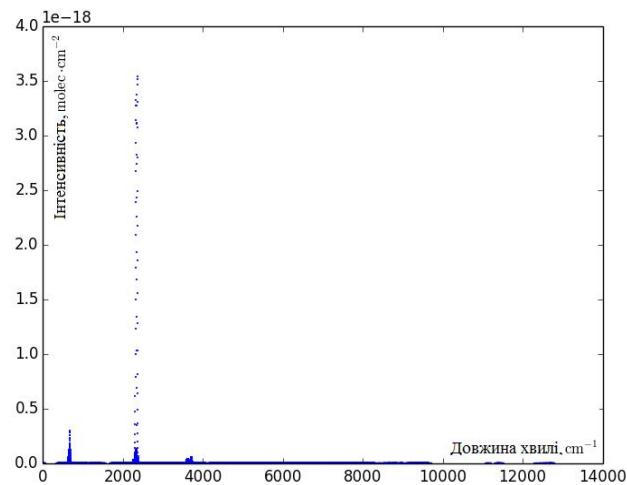
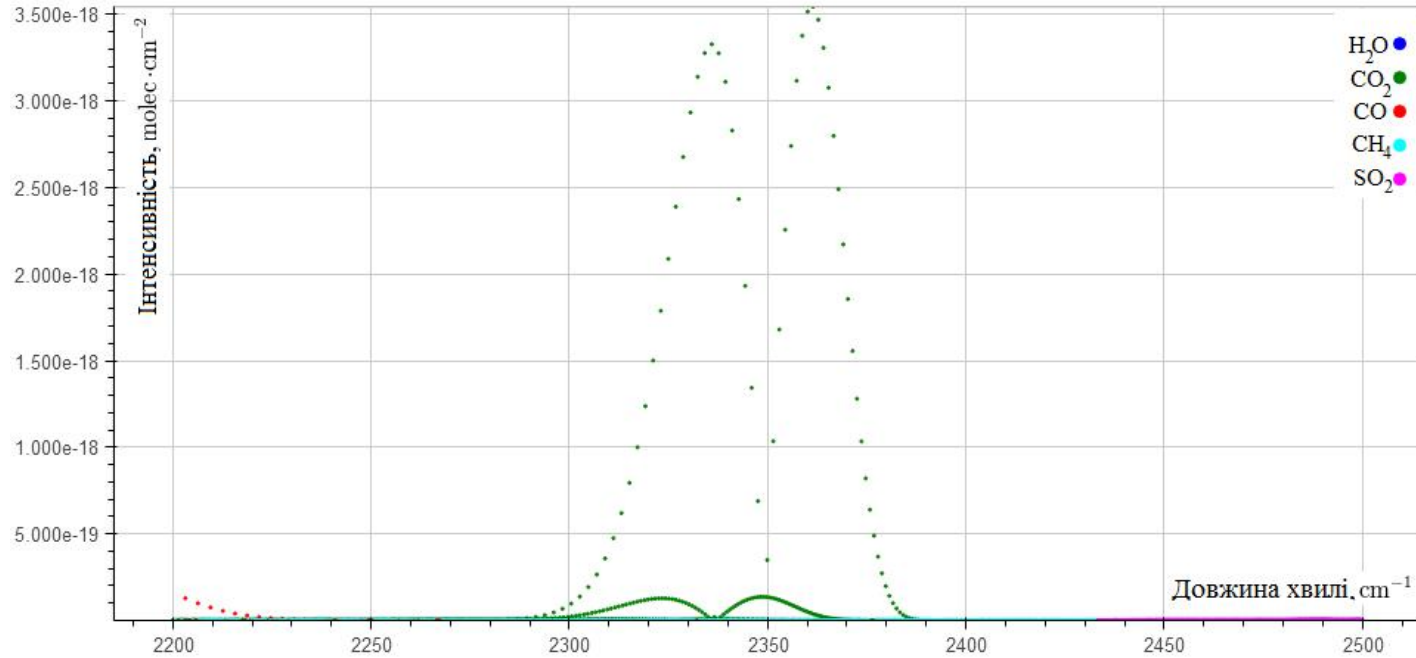


$$I_l = I_0 \cdot e^{-k_n C l},$$

**Зв'язок інтенсивності опромінення, що
пройшла повітря, з концентрацією
досліджуваного газу**

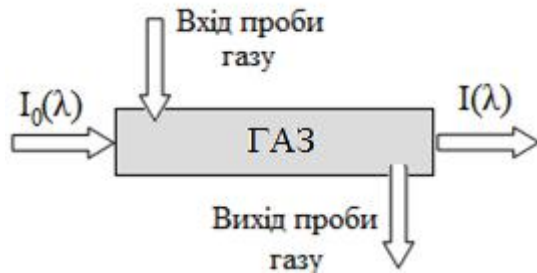
де C – концентрацією досліджуваного газу, l –
довжиною шляху поглинання, k_n – показники
поглинання

Спектр поглинання основних компонентів атмосферних газів у діапазоні 4 – 4.5 мкм



Спектр поглинання CO₂ у діапазоні 0.75-15 мкм

Модель ослаблення випромінювання в середовищі газів



$$C_{\%об.} = C \cdot 10^2 \cdot \frac{R \cdot T}{P},$$

де R – універсальна газова стала

Коефіцієнт поглинання CO_2 у атмосферних газах

$$k_i(\lambda) = \frac{S(\lambda_i)}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2}$$

$$S(\lambda_s) = \int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda,$$

де S – інтенсивність смуги поглинання, λ та λ_0 – довжина та центр смуги поглинання, σ – ширина смуги поглинання

Зв'язок інтенсивності опромінення, що пройшла через газ, з концентрацією досліджуваного газу

$$I_l = I_0 \cdot e^{-k_n C l},$$

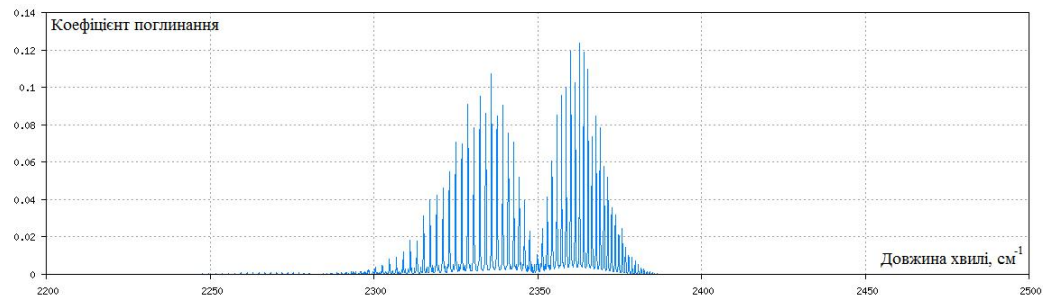
де C – концентрацією досліджуваного газу, l – довжиною шляху поглинання, k_n – показники поглинання

Спектральний показник поглинання

$$\chi = k_n(\lambda) \cdot \frac{8333, (3) \cdot T}{P}$$

$$P_{аб.} = P_{атм.} - P_{розр.} \quad P_{атм.} = P_0 \cdot e^{-\frac{M_m \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \quad P_{аб.} = P_0 \cdot e^{-\frac{M_m \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} - P_{розр.}$$

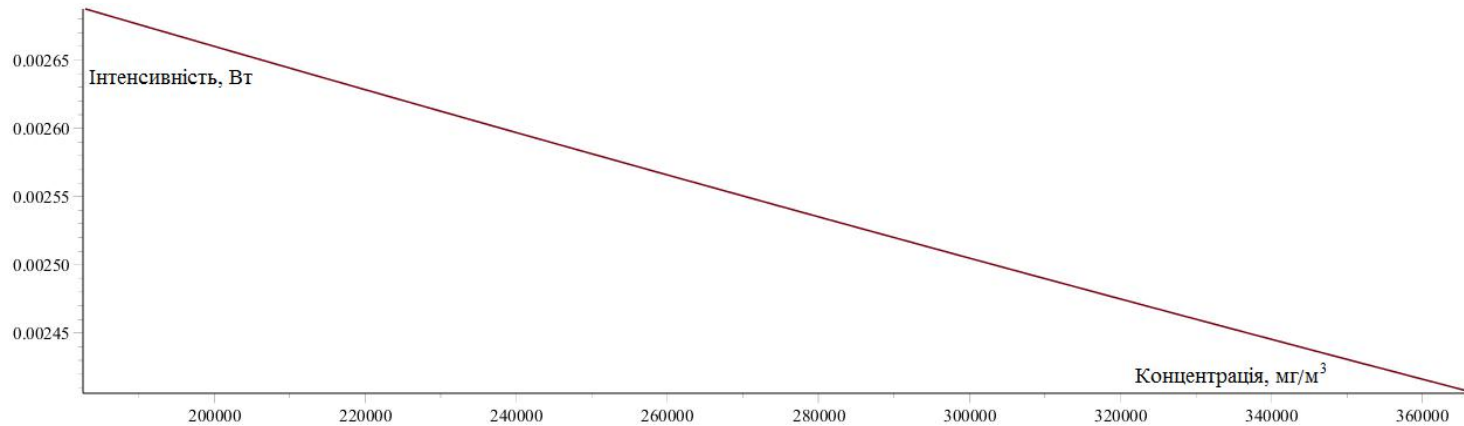
де M – молярна маса сухого повітря (0.029), g – прискорення вільного падіння, h – висота



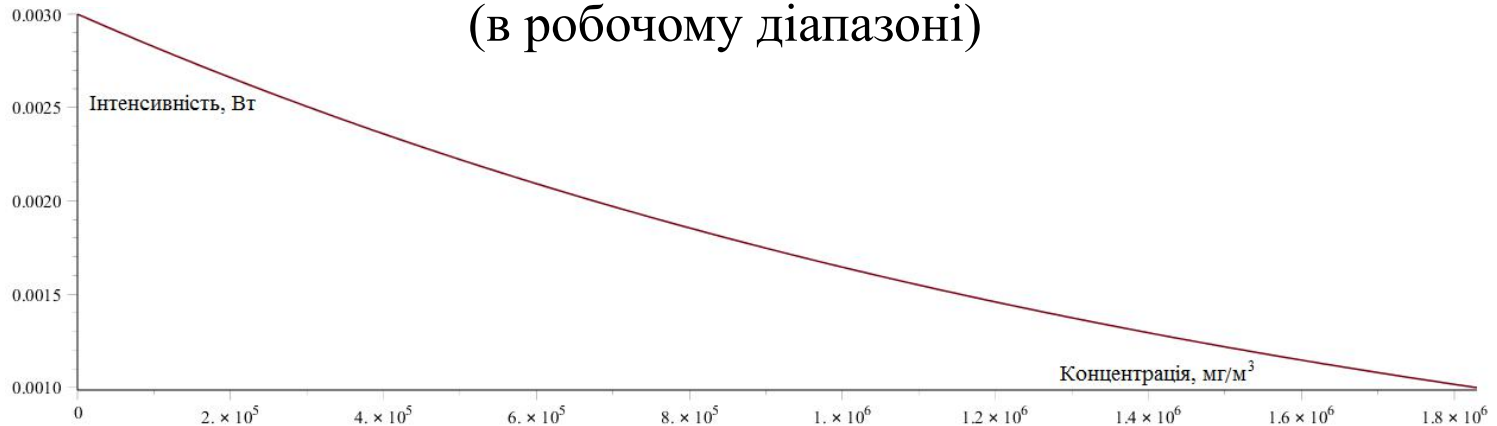
Графічне моделювання фрагменту бази даних HITRAN

Модель ослаблення випромінювання в середовищі газів

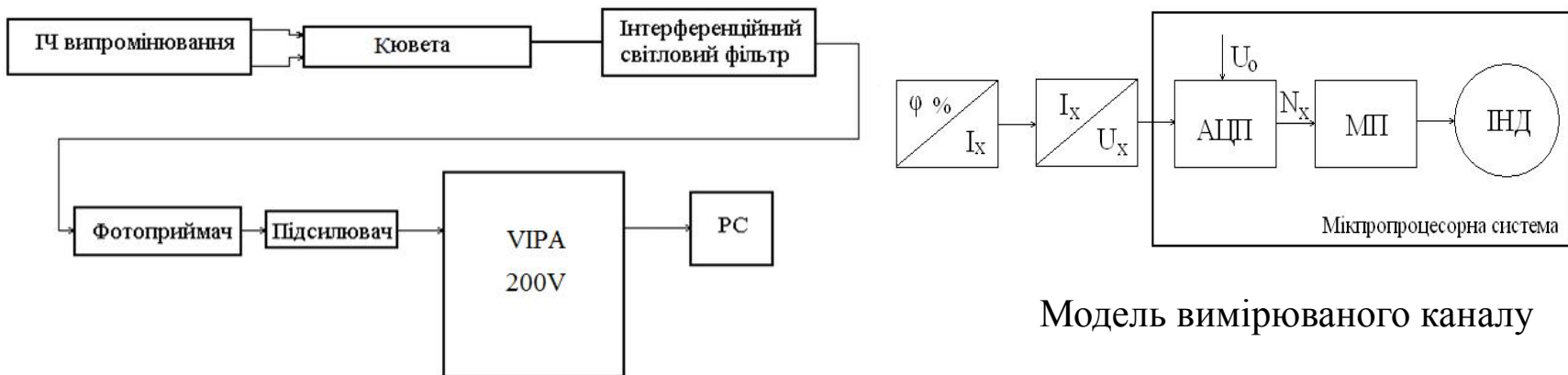
$$I_l = I_0 \cdot e^{-\frac{\int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2} \cdot P_0 \cdot e^{\frac{-0,0083 \cdot T}{R \cdot T} - P_{\text{розр.}}} \cdot \frac{C}{M} \cdot l}$$



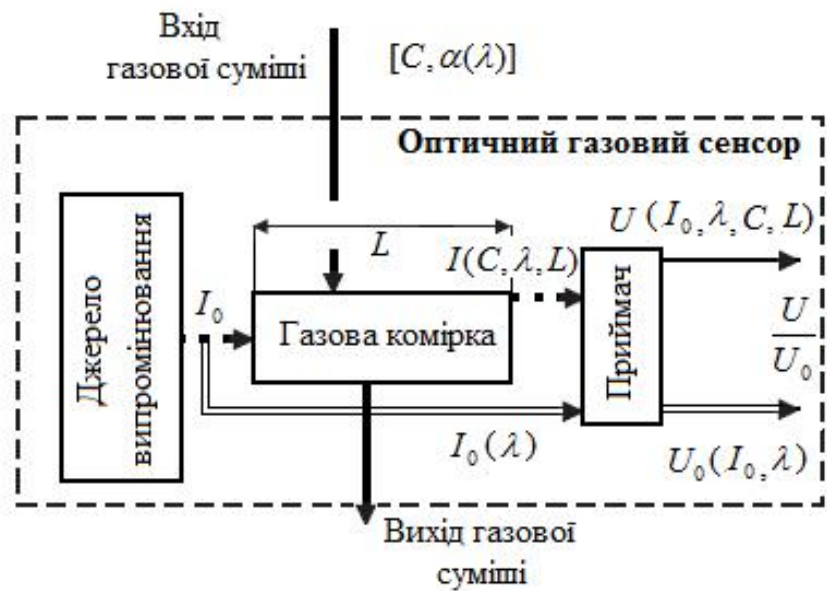
Моделювання залежності концентрації двоокису вуглецю від інтенсивності
(в робочому діапазоні)



Моделювання залежності концентрації двоокису вуглецю від інтенсивності
(в повному діапазоні)

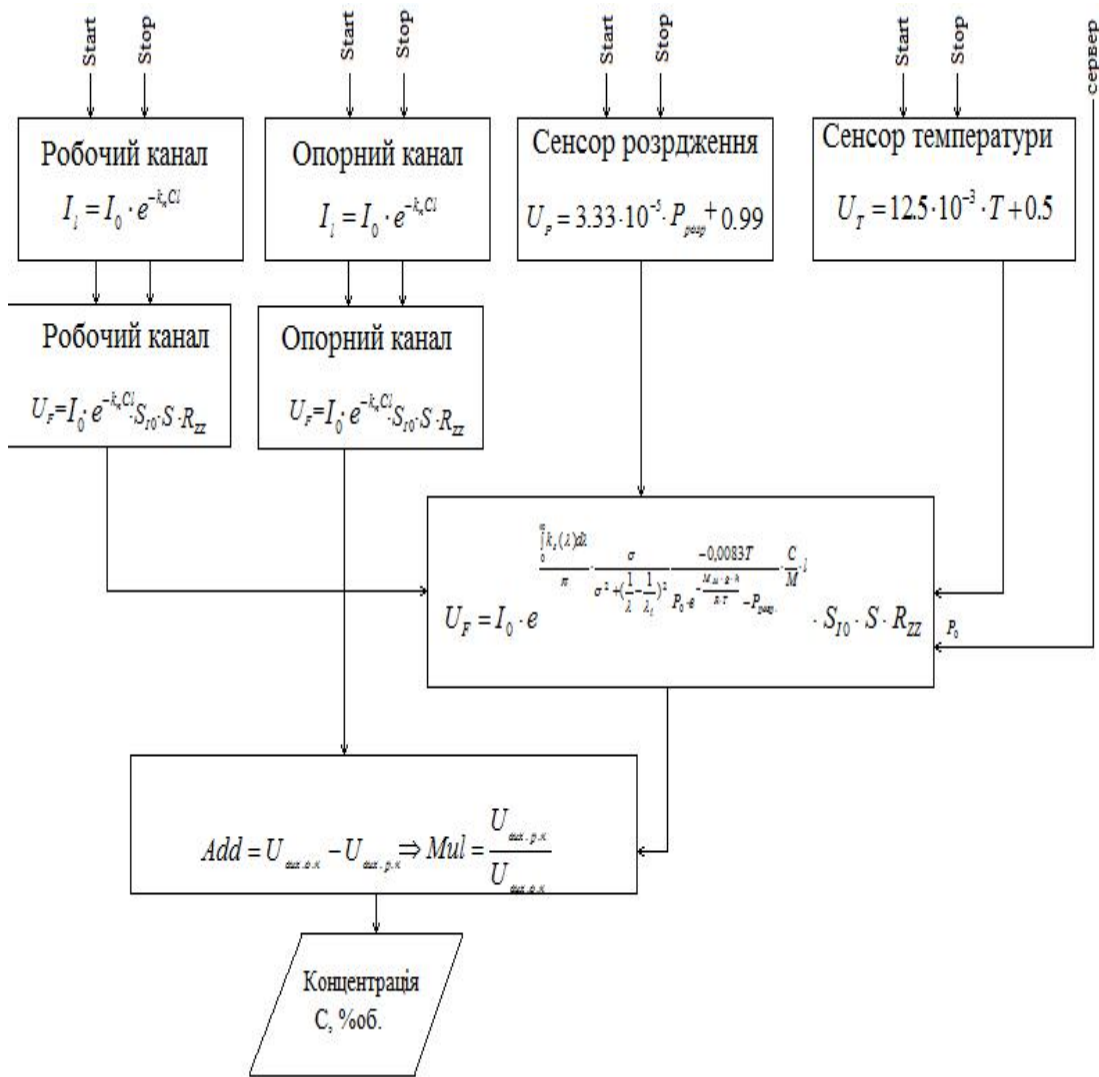


Функціональна схема системи контролю оксиду карбону

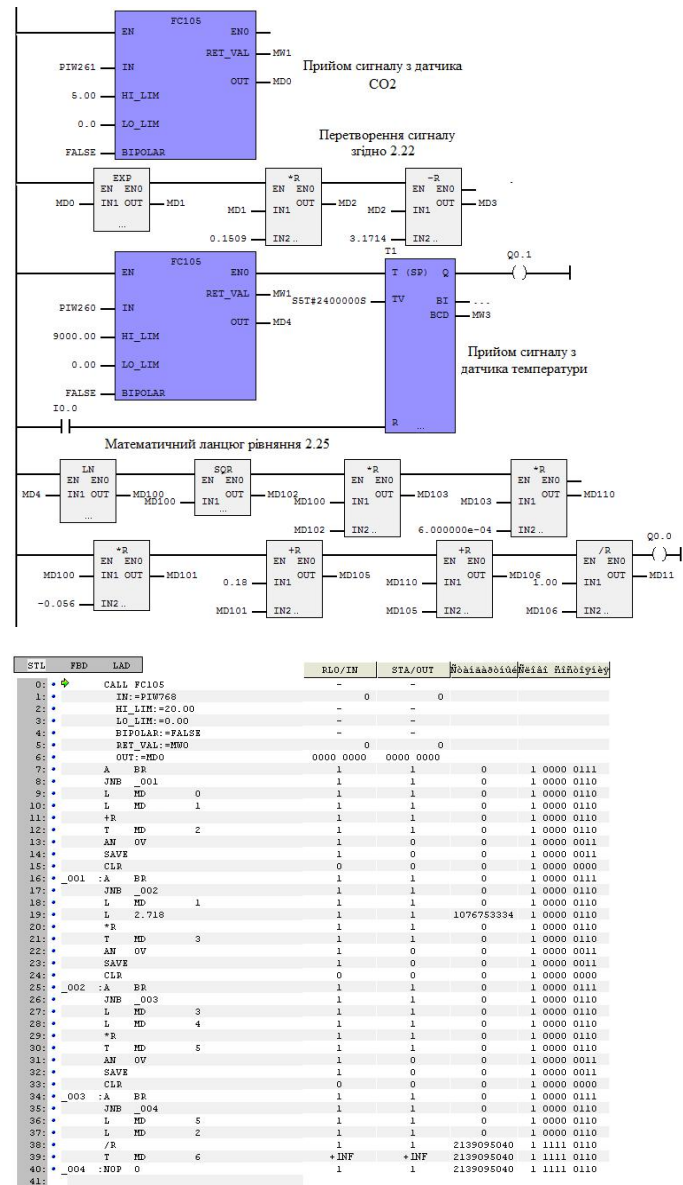


Структурна схема розробленого оптичного газового сенсора

Алгоритм роботи засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у атмосферних газах



Програмна реалізація одного з вимірювальних каналів



Методика оцінення невизначеності вимірювання

Розрахунок стандартної невизначеності типу А

$$u_A(\bar{I}_l) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{l_i} - \bar{U}_l)^2}{n \cdot (n-1)}}$$

$$u_A(\bar{T}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

$$u_A(\bar{P}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

Розраховані середні значення дорівнюють $U = 3.783$ В, $T = 98.059$ °С, $P = 0.053$ Па.

$u_A(U_l) = 0,01$ В, $u_A(T) = 0,2$ °С, $u_A(P) = 0,01$ Па.

Обчислимо коефіцієнти кореляції для кожної з пар величин

$$r(T, P) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}) \cdot (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$$

$$r(T, U_l) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}) \cdot (U_{l_i} - \bar{U}_l)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{l_i} - \bar{U}_l)^2}}$$

$$r(P, U_l) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \cdot (U_{l_i} - \bar{U}_l)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{l_i} - \bar{U}_l)^2}}$$

$r(T, P) = 0,602$, $r(T, U_l) = 0,828$, $r(P, U_l) = 0,709$ → Висновок. Кореляція між усіма впливними величинами присутня

Сумарна стандартна невизначеність типу А

$$u_{cA}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial U_l}\right)^2 \cdot u_A^2(U_l) + \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)^2 \cdot u_A^2(T) + \left(\frac{\partial f}{\partial P}\right)^2 \cdot u_A^2(P) +$$

$$+ 2r(T, U_l) \cdot \frac{\partial f}{\partial T} \cdot \frac{\partial f}{\partial U_l} \cdot u_A(T) \cdot u_A(U_l) + 2r(P, U_l) \cdot \frac{\partial f}{\partial P} \cdot \frac{\partial f}{\partial U_l} \cdot u_A(P) \cdot u_A(U_l) +$$

$$+ 2r(T, P) \cdot \frac{\partial f}{\partial T} \cdot \frac{\partial f}{\partial P} \cdot u_A(T) \cdot u_A(P)$$

$$u_{cA} = 7,91 \text{ мг/м}^3.$$

Сумарна стандартна невизначеність типу В дорівнює

$$u_{cB}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial S_{IO}}\right)^2 \cdot u_{B1}^2(S_{IO}) + \left(\frac{\partial f}{\partial I_0}\right)^2 \cdot u_{B2}^2(I_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial R_{ZZ}}\right)^2 \cdot u_{B3}^2(R_{ZZ}) +$$

$$+ \left(\frac{\partial f}{\partial S}\right)^2 \cdot u_{B4}^2(S) + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \cdot u_{B5}^2(L).$$

$$u_{cB} = 119,1 \text{ мг/м}^3$$

Коефіцієнтів чутливості

$$\frac{df}{dS_{IO}} = -11800,4 \text{ мг/(м}^3) \quad \frac{df}{dI_0} = 9,01 \text{ мг/(м}^3\text{ВТ)}; \quad \frac{df}{dS} = 917118 \text{ мг/(м}^3\text{м}^2)$$

$$\frac{df}{dR_{ZZ}} = -15,08 \text{ мг/(м}^3\text{Ом)} \quad \frac{df}{dL} = 354,78 \text{ мг/(мм}^3).$$

Сумарна стандартна невизначеність

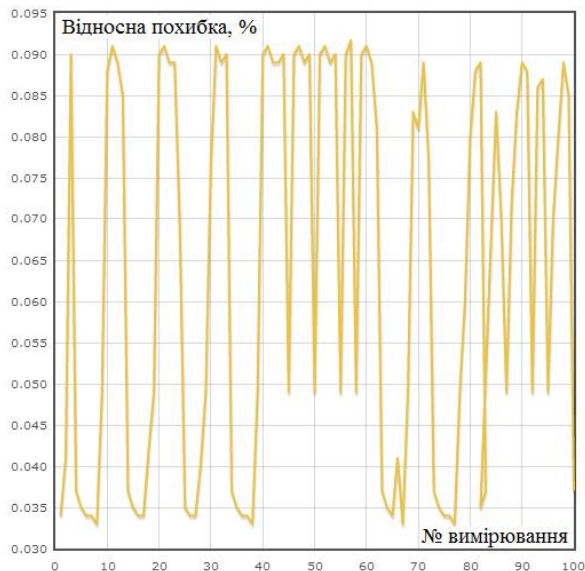
$$u_c = \sqrt{u_{cA}^2 + u_{cB}^2} = 121,01 [\text{мг} / \text{м}^3]$$

Розширену невизначеність результату вимірювання

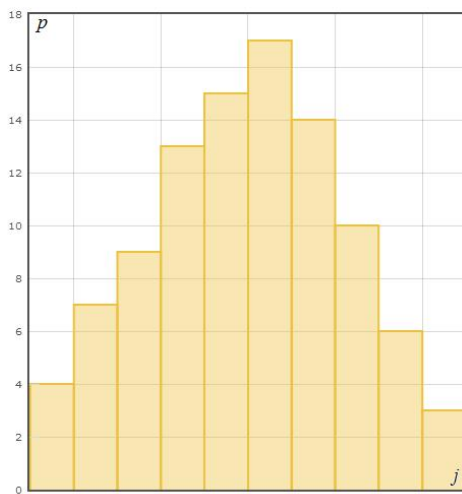
$$b_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{u_A^4(\bar{U}_l)}{b} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial U_l}\right)^4 + \frac{u_A^4(\bar{T})}{b} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)^4 + \frac{u_A^4(\bar{P})}{b} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial P}\right)^4}$$

$$k = t_p(b_{eff}) \quad U = k \cdot u_c = 237.18 [\text{мг} / \text{м}^3]$$

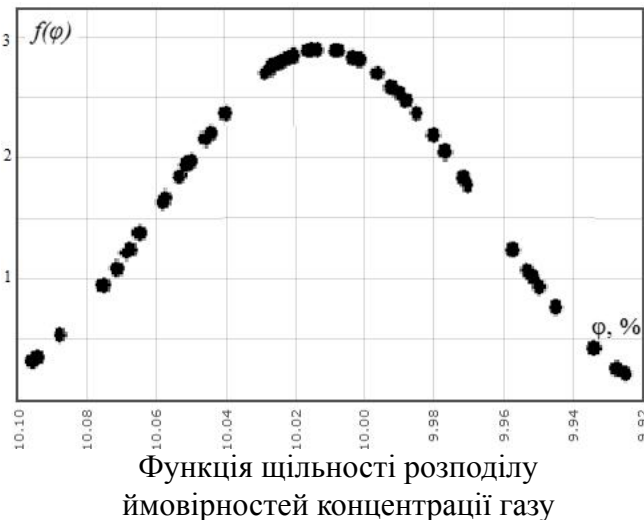
Визначення вірогідності контролю та точності вимірювань концентрації газів



Графічне представлення похибки вимірювань Δ



Гістограма розподілу частот ймовірностей значень концентрації досліджуваного газу і ймовірностей значень похибок вимірювання



Інструментальну вірогідність контролю

$$D_i = 1 - \alpha - \beta \quad D_i = 0,968$$

$$\alpha = 0,0312, \quad \beta = 0,0010$$

$$\alpha = \int_{C_A}^{C_B} f(C) \left[\int_{C_A-\Delta}^{C_A} \varphi(\Delta) d\Delta + \int_{C_B}^{C_B+\Delta} \varphi(\Delta) d\Delta \right] dC$$

$$\text{Помилки 2-ого роду} \quad \beta = \int_{C_B}^{C_B+\Delta} f(C) \left[\int_{C_B-\Delta}^{C_B} \varphi(\Delta) d\Delta \right] dC + \int_{C_A-\Delta}^{C_A} f(C) \left[\int_{C_A}^{C_A+\Delta} \varphi(\Delta) d\Delta \right] dC$$

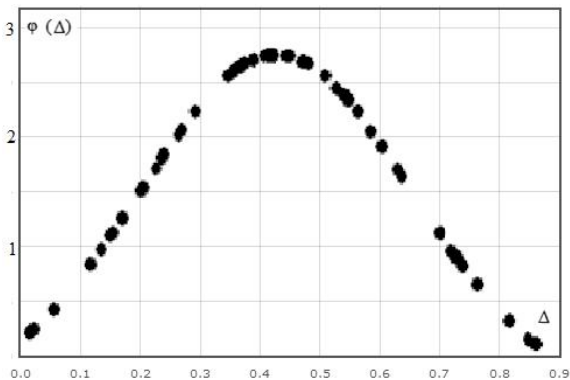
$$f(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(C-\bar{C})^2}{2\sigma^2}}$$

$$\varphi(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(\Delta-\bar{\Delta})^2}{2\sigma^2}}$$

Методична вірогідність контролю

$$D_m = \frac{N}{N_\Sigma} \rightarrow 1$$

$$\text{Точність } T = 108$$



Функція щільності розподілу ймовірностей похибки вимірювання концентрації газу

ВИСНОВКИ

В МКР розроблено сенсор оксиду карбону на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу з покращеними метрологічними характеристиками.

Дослідження, проведені в роботі, дозволили отримати нові, науково-обґрунтовані теоретичні та практичні результати, які є істотними для підвищення точності при необхідній швидкодії процесу контролю концентрації.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Проведено аналіз існуючих систем та методів контролю оксиду карбону. На основі аналізу відомих методів та засобів контролю оксид у встановлені їх основні недоліки та вибрано напрямок досліджень.
2. Розроблена математична модель вимірювача оксиду карбону на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу.
3. Технічно обґрунтовано реалізацію структури сенсора оксиду карбону. Розраховано статичні та динамічні характеристики сенсора.
4. Розроблений програмний засіб для автоматичного контролю оксиду карбону. Обґрунтовано вибір апаратного забезпечення – це потужний ПЛК VIPA 200V, та програмне забезпечення для реалізації системи. Програму контролю оксиду карбону реалізовано у програмному пакеті WinPLC 7 на мові програмування STL.

Апробація результатів МКР

Апробація результатів роботи. Результати роботи обговорювалися на VI Міжнародній міжвузівській школі-семінар «Методи і засоби діагностики в техніці та соціумі». (м. Івано-Франківськ 2018).

Публікації

Публікації. Результати роботи опубліковано науковій праці: [Кучерук В.Ю., Дудатьєв І.А., Баранець В.В., Драч Р.П. Засіб контролю концентрації природних газів у атмосферних газоподібних середовищах на основі оптико-абсорбційного методу // // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, №2, 2018, с. 39-46.](#)

Дякую за увагу!