

**“Засіб контролю та генерації озону у регульованих  
газових середовищах”**

**доповідач: Горбатюк Владислав Васильович  
науковий керівник: к.т.н., ст. викл. Дудадтьєв І.А.**

- **Актуальність теми.** Ринок фруктів і овочів з кожним роком висуває дедалі вищі вимоги до якості товару. Водночас процес зберігання або переробки має бути спрямований на підтримання органолептичних якостей, збереження вітамінів, мінералів, а також біологічних і дієтичних властивостей фруктів і овочів.
- Однак на сьогодні втрати врожаю, в тому числі й плодоовочевих продуктів, вже на стадії зберігання становлять понад 25%. Основною причиною цих втрат, окрім дрібних гризунів і комах, є різні мікроорганізми (цвіль, стрептококи, грибки, спорові бактерії тощо) та просто недостатнє або неякісне забезпечення холодильними складами і сховищами. Розвиток сучасного агропромислового господарства, поряд із отриманням високих врожаїв, потребує вирішення проблеми тривалого зберігання і якісної переробки сільгосппродуктів. У зв'язку з цим одним із найбільш важливих завдань є розробка нових технологій зберігання та переробки плодоовочевої продукції, при яких втрати врожаю було б зведено до мінімуму, при цьому зовнішній вигляд і корисні властивості продуктів зберігалися б у природному і незмінному вигляді впродовж усього терміну зберігання. Успіх зберігання овочів і фруктів залежить від того, які умови буде створено для цього. Шляхом забезпечення оптимальних умов зберігання можна підвищити лежкість плодів та овочів, і, навпаки, при порушенні режиму зберігання ця властивість погіршиться. Процес попереднього охолодження плодоовочевої продукції є основною умовою і запорукою збереження її якості при закладці на тривале зберігання або подальшій переробці. Однак завдяки цьому можна подовжити термін зберігання фруктів і овочів лише на короткий час Основні чинники успішного зберігання в холодильних камерах, складах і сховищах – температура, вологість і склад газового середовища.
- Відсутність контрольно-виміральної апаратури, такої як система контролю озону у регульованому газовому середовищі (РГС). Тому питання розробки ВП концентрації озону, що забезпечує високу ефективність роботи РГС, є актуальним.
- **Мета дослідження.** Метою роботи є підвищення точності при необхідній швидкодії процесу контролю концентрації озону у РГС 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 озону;
- структурно-технічне обґрунтування реалізації засобу контролю концентрації озону;
- розробка функціональної залежності засобу для контролю концентрації озону;
- розробка структурної схеми засобу контролю озону;
- проведення експериментальних досліджень та підтвердження адекватності розробленого засобу контролю озону.
- *Об'єктом дослідження* в магістерській роботі є процес вимірального контролю концентрації озону.
- *Предметом дослідження* є методи та засоби підвищення точності вимірювання при заданій швидкодії оптико-абсорбційного методу вимірювання концентрації озону.
- **Методи дослідження.** При вирішенні поставлених задач у роботі були використані методи теорії вимірального контролю, теорії планування наукового експерименту в ході експериментальних досліджень, комп'ютерного моделювання, теорії вимірювань, похибок вимірювань та технічного контролю.
- **Наукова новизна одержаних результатів:**
- Вдосконалено математичну модель фотоелектричного вимірювального перетворювача концентрації озону, яка враховує дестабілізуючі параметри складових елементів фотоприймача та пов'язує вихідну величину – значення вихідної напруги фотоприймача та вхідну – значення інтенсивності світлового потоку, і, як наслідок, концентрацію озону, що дозволило підвищити точність вимірювання у 1,1-1,2 рази.
- Розроблена структурно-алгоритмічна організація системи контролю озону на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу.
- Вперше запропоновано застосувати зміну параметрів розряду в озонаторі в залежності від навколишніх умов, що дозволило підвищити ефективність синтезу озону.
- **Практичне значення одержаних результатів.** У роботі отримані такі практичні результати:
- 1. Розроблена структурно-алгоритмічна організація засобу контролю концентрації озону.
- 2. Розроблено структурну схему засобу контролю озону.
- 3. Розроблено функціональну схему трубчастого генератора озону.
- 4. Методики, використані у роботі, можуть бути застосовані при побудові систем контролю складу газів у РГС.

# Порівняння методів для контролю концентрації озону

Метод/ Параметр	Діапазон вимірювань	Швидкість	Надійність	Багато- компонентність	Вибірковість	УЛКЕ
Термокондуктометричний	0.2	0.2	0.9	0.9	0.1	0.46
Термохімічний	0.3	0.2	0.8	0.8	0.3	0.48
Магнітний	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.7
Пневматичний	0.1	0.1	0.7	0.7	0.2	0.36
Пневмоакустичний	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.16
Оптико-абсорбційний інфрачервоний	1	0.9	0.8	0.9	0.8	0.88
Хемілюмінесцентний	0.9	0.8	0.3	0.9	0.8	0.74
Флуоресцентний	0.9	0.8	0.3	0.9	0.8	0.74
Фотоколориметричний	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.68

Узагальнений якісний критерій ефективності

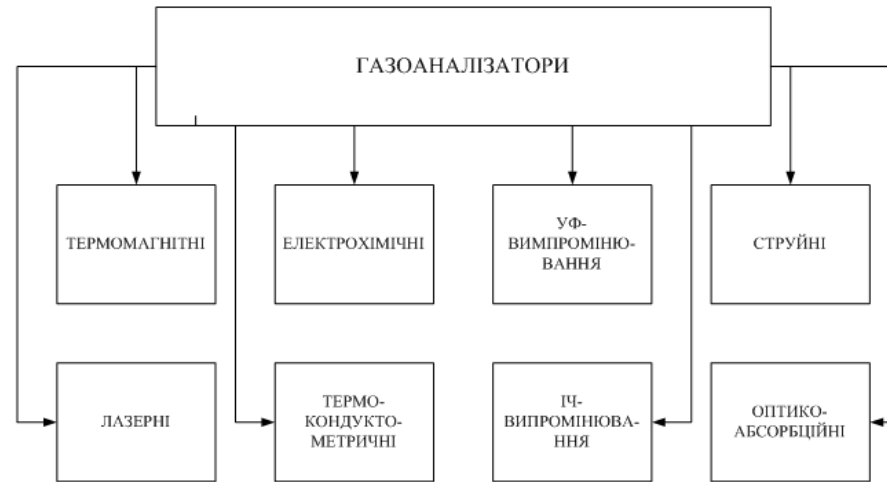
$$k = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{n}$$

де  $a_i$  – вагові коефіцієнти;  $n$  – загальна кількість якісних критеріїв ефективності

$$E_i = \frac{k_i}{k_{opt}}$$

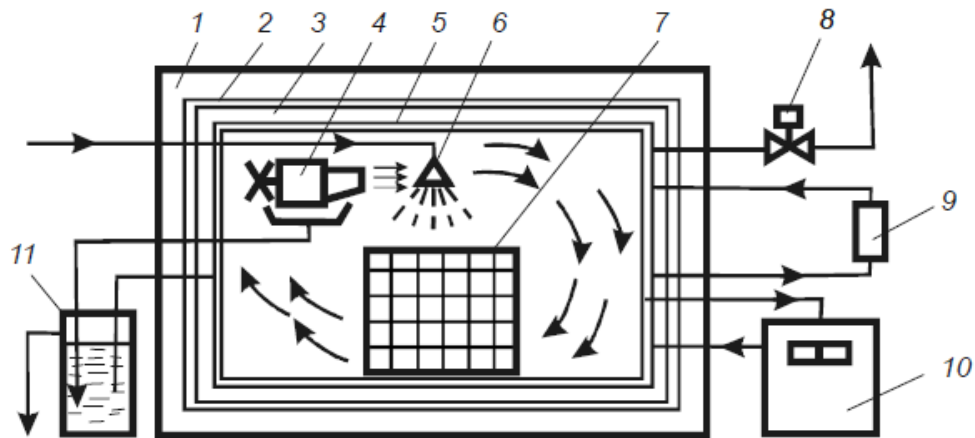
де  $k_i$  – узагальнений якісний критерій  $i$ -ого методу;  $k_{opt}$  – потенційний (зразковий) метод контролю.

# Систематизація газоаналізаторів



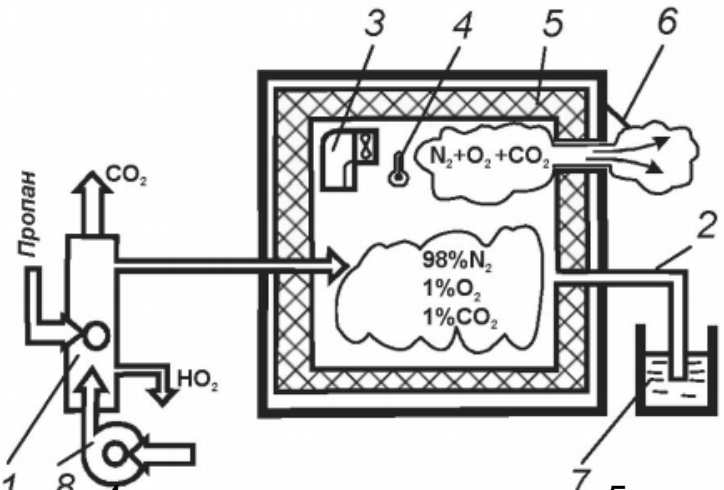
## Сучасні засоби вимірювання концентрації компонентів газу (по каналу O<sub>3</sub>)

Прилад	Діапазон температур, °С	Робочий тиск, кПА	Діапазон вимірювання, %	Зона не чутливості, с	Похибка, % / Вірогідність контролю*	Дрейф, %
A-8M	до 50	35	0,01 до 99.9	< 10	±1 / 0.8	< ± 1
NDIR Gas sensor MH-410D	-20 - 60	5	20 до 100	30	5 / 0.85	< ± 1
<a href="#">ОПТОГАЗ</a>	до 200	40	0-20	15	6/0.82	< ± 1
Ezo do CTH-37	до 400	40	0-50	10	5/0.94	< ± 1

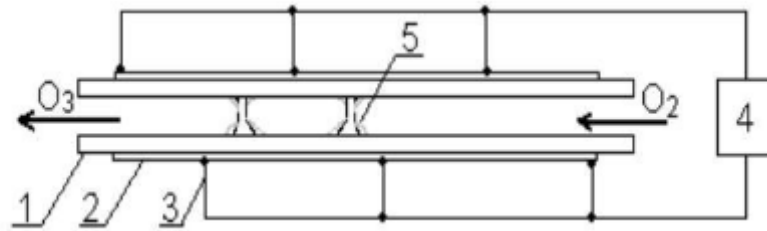


Холодильна камера для зберігання плодів та овочів у регульованому газовому середовищі

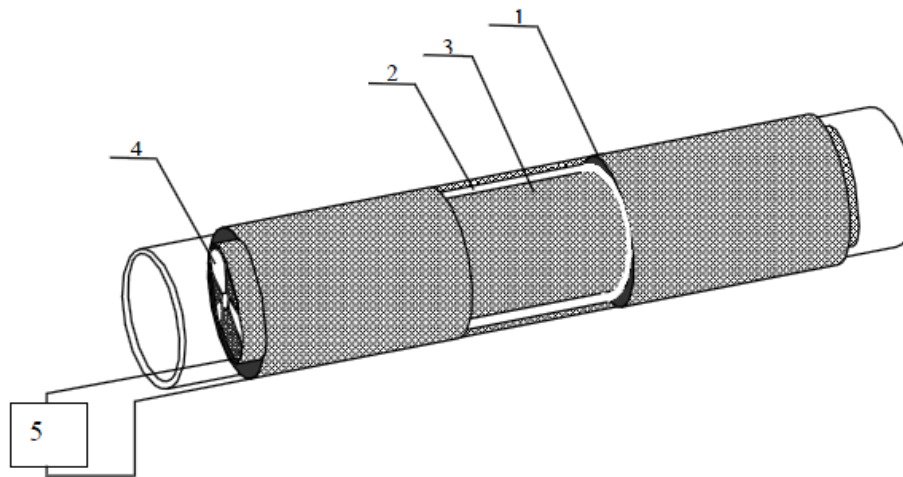
1 — обгороджувальні конструкції; 2 — пароізоляція; 3 — теплоізоляція; 4 — повітроохолоджувач; 5 — газоізоляція; 6 — зволожник; 7 — штабель з продукцією; 8 — клапан скидання газового середовища; 9 — обладнання для регулювання газового складу середовища; 10 — газоаналізатор; 11 — гідросифон



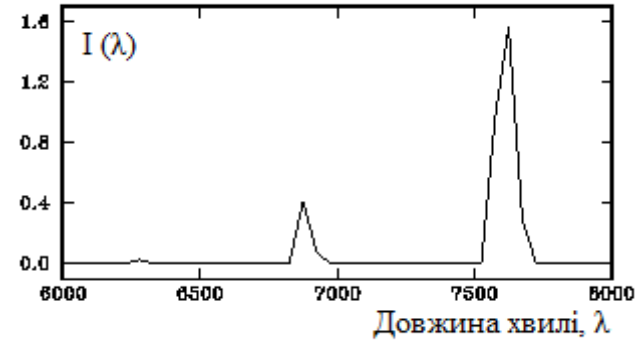
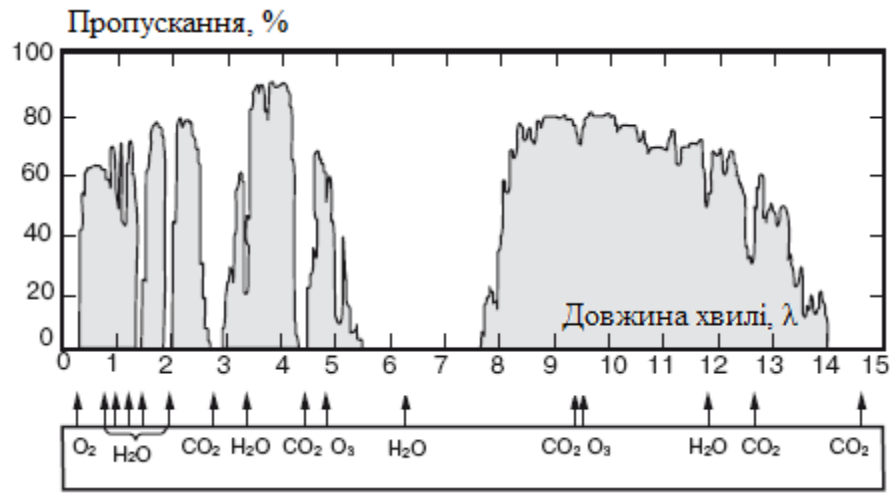
1 — генератор; 2 — трубопровід; 3 — повітроохолоджувач; 4 — регулятор температури; 5 — герметична холодильна камера; 6 — скидний клапан; 7 — гідросифон; 8 — вентилятор.



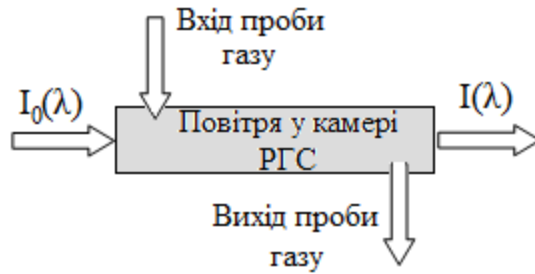
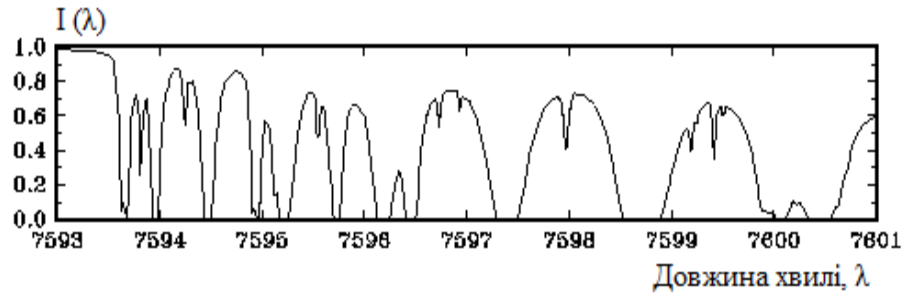
Озонатор з високоомними електродами



Конструкція трубчастого генератора озону



Спектр поглинання O<sub>3</sub>



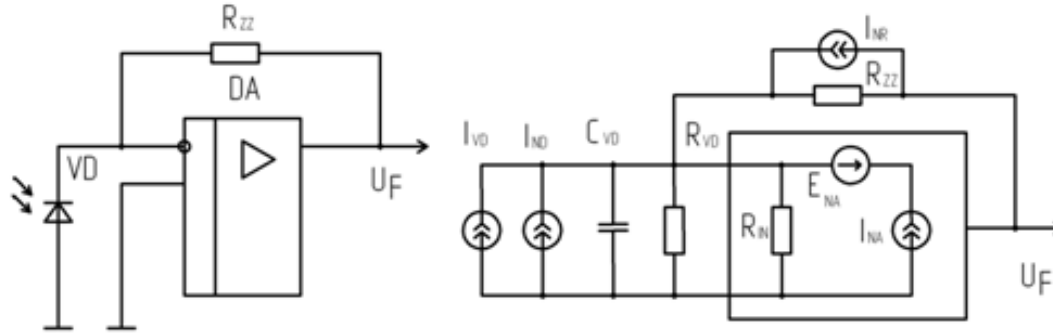
Модель ослаблення випромінювання в РГС

**Зв'язок інтенсивності опромінення, що пройшла через димовий 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

# Принципова та еквівалентна схеми фотоприймача на основі пари фотодіод - операційний підсилювач



$$I_{VD} = \frac{\Phi \cdot S_{I0}}{\sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})}} - I_s \cdot (\exp(e_e \cdot U_{VD} / kT) - 1),$$

де  $I_{VD}$  – струм фотодіоду;  $\Phi$  – потік опромінення,  $S_{I0}$  – інтегральна струмова чутливість фотодіоду при немодульованому опроміненні;  $I_s$  – темновий струм фотодіоду;  $U_{VD}$  – падіння напруги на фотодіоді;  $T$  – абсолютна температура;  $k$  – постійна Больцмана;  $e_e$  – заряд електрону;  $\Omega$  – циклічна частота модуляції потоку опромінення;  $\tau_{VD}$  – постійна часу фотодіоду, яка залежить від величин внутрішнього опору фотодіоду та паразитної ємності фотодіоду.

$$U_F = \frac{I_{VD} \cdot R_{ZZ}}{1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}} + \Delta I \cdot R_{ZZ} + U_{SM} + U_N,$$

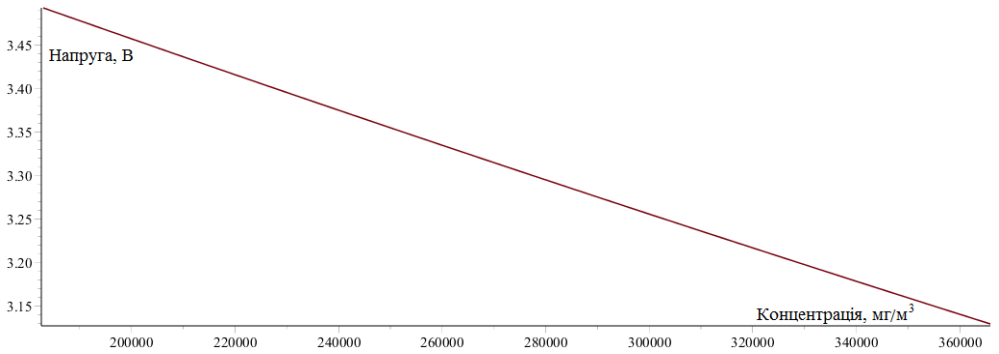
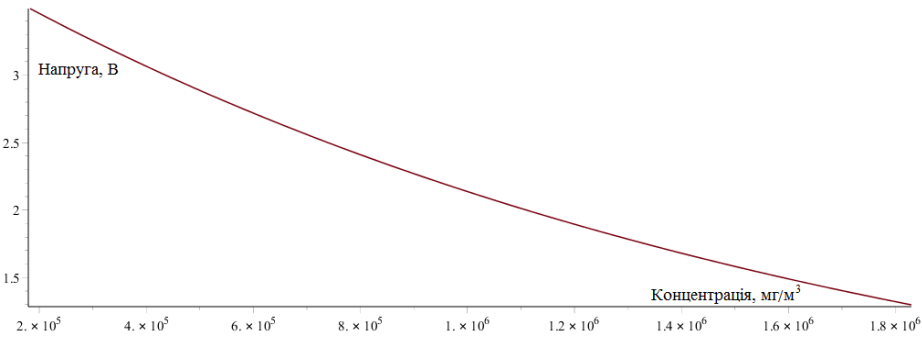
де  $K_0$  – коефіцієнт передачі операційного підсилювача;  $R_{IN}$  – вхідний опір операційного підсилювача;  $U_{SM}$  – напруга зміщення нуля операційного підсилювача;  $\Delta I$  – різниця вхідних струмів операційного підсилювача;  $R_{ZZ}$  – опір в колі зворотнього зв'язку операційного підсилювача;  $U_N$  – напруга шуму на виході фотоприймача, яка залежить від шумового струму резистора в колі зворотнього зв'язку, шумового струму фотодіоду, шумового струму операційного підсилювача та шумової напруги операційного підсилювача.



# Вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач

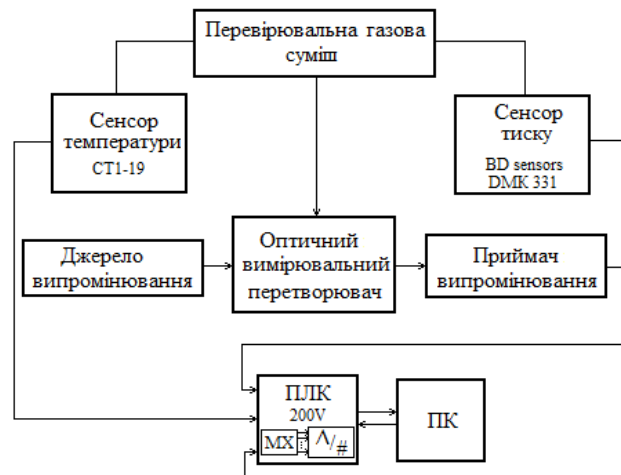
$$U_F = \frac{I \cdot S \cdot S_{I0} \cdot R_{ZZ}}{\left(1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}\right) \cdot \sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})}} - \frac{I_S \cdot R_{ZZ} \cdot (\exp(e \cdot U_{VD} / kT) - 1)}{1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}} + \Delta I \cdot R_{ZZ} + U_{SM} + U_N$$

$$U_F = I_0 \cdot e \cdot \frac{\int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2} \cdot P_0 \cdot e^{-\frac{M_M \cdot g \cdot h}{R \cdot T} - P_{розр.}} \cdot \frac{C \cdot l}{M} \cdot S_{I0} \cdot S \cdot R$$

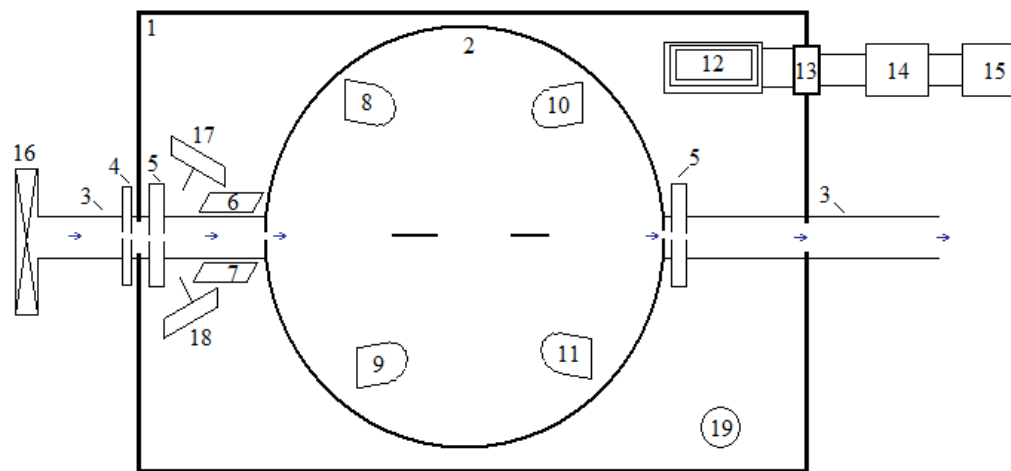


Моделювання залежності концентрації O<sub>3</sub> від напруги у робочому та повному діапазоні

# Структурна схема засобу контролю концентрації озону



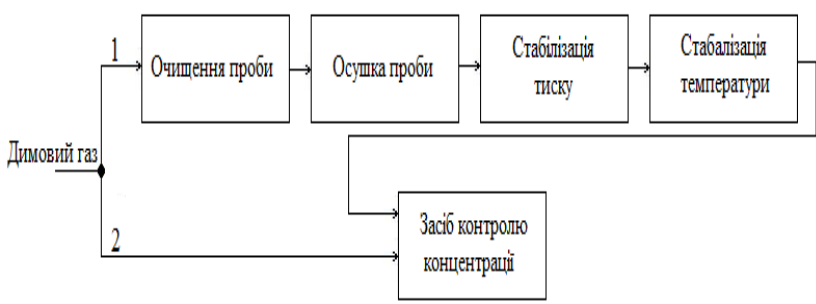
# Збірне креслення засобу контролю концентрації озону



1 – корпус засобу контролю складу концентрації озону; 2 – корпус оптичного сенсору; 3 – газозабірний зонд шланг для закачування/відкачування пробу у/з засобу контролю; 4 – фільтр (від механічних домішок); 5 – вентилятори; 6 – сенсор тиску; 7 – сенсор температури; 8 – СВД робочого каналу; 9 – ФД робочого каналу; 10 – ФД опорного каналу; 11 – СВД опорного каналу; 12 – плата; 13 – гніздо для роз'ємів; 14 – ПЛК з вбудованим АЦП; 15 – ПК; 16 – перевірювальна газова суміш; 17 – нагрівач; 18 – охолоджувач; 19 – сигналізація.

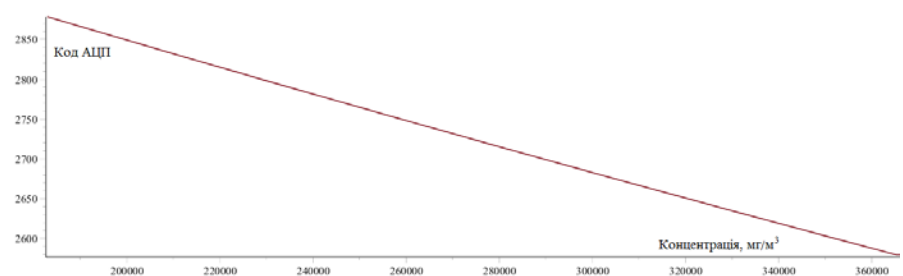
# Оцінення основних метрологічних характеристик вимірювальних каналів засобу контролю концентрації озону

Шляхи подачі димового газу на ЗК, для його аналізу

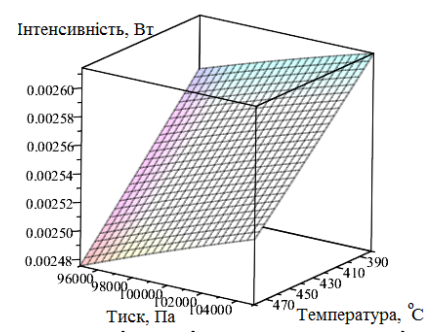
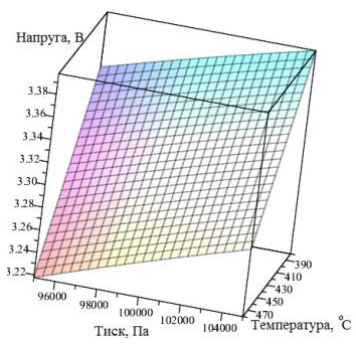
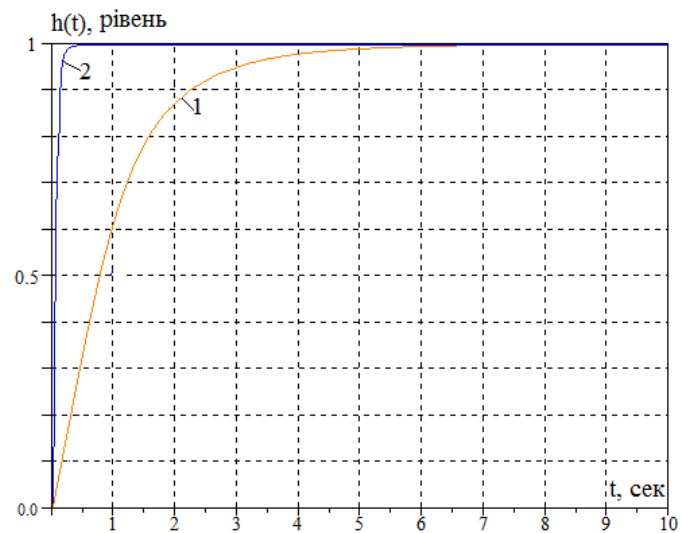


Рівняння перетворення вимірювального каналу

$$N_x = \frac{I_0 \cdot e^{-\frac{\int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda}{\pi \sigma^2 + (\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i})^2} P_0 \cdot e^{-\frac{-0,0083 \cdot T}{R \cdot T} - P_{розр.}} \cdot \frac{C \cdot l}{M}}}{5.5} \cdot S_{I0} \cdot S \cdot R \cdot 2^{12}$$



Графічне представлення рівняння вимірювального каналу концентрації озону

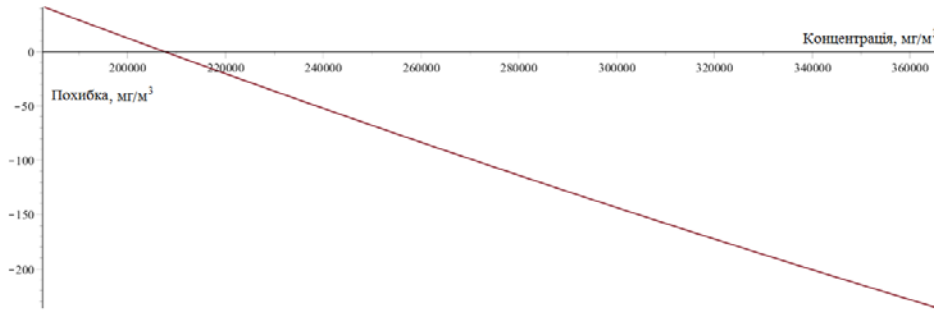


Перехідний процес у ВП з закритим – 1 (відкритим – 2) оптичним каналом

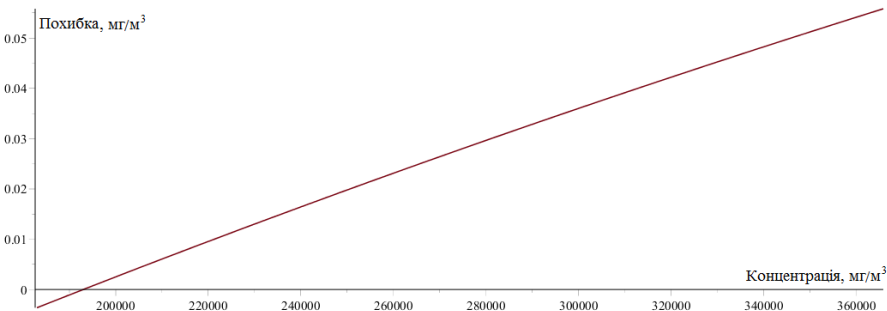
Залежність напруги на виході оптичного сенсора від тиску та температури представлено (при сталій концентрації)

Залежність інтенсивності випромінювання від тиску та температури представлено (при сталій концентрації)

# Представлення вимірювального перетворення

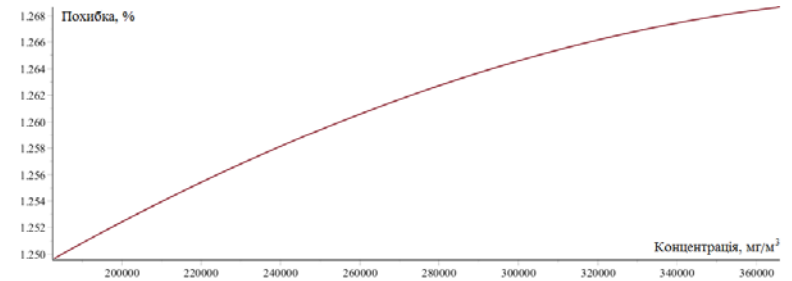


## Представлення абсолютної похибки нелінійності

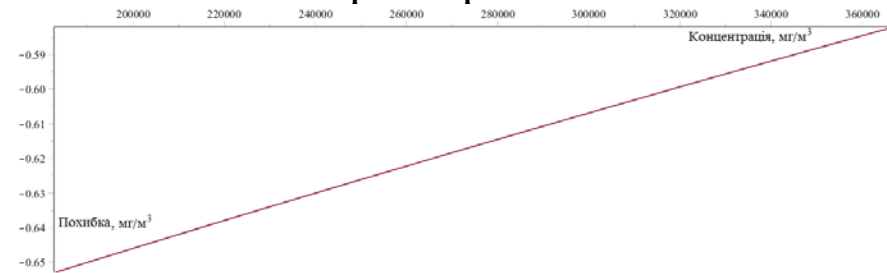


## Характеристика зміни абсолютної мультиплікативної похибки

$$N_x = \text{fun}(C_n, T_n, P_n, S_{ion}, R_{zzn}) + \frac{\partial N_x}{\partial C} (C - C_n) + \frac{\partial N_x}{\partial T} (T - T_n) + \frac{\partial N_x}{\partial P} (P - P_n) + \frac{\partial N_x}{\partial S_{io}} (S_{io} - S_{ion}) + \frac{\partial N_x}{\partial R_{zz}} (R_{zz} - R_{zzn}) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 N_x}{\partial C^2} (C - C_n)^2 + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial T} (C - C_n)(T - T_n) + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial P} (C - C_n)(P - P_n) + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial T^2} (T - T_n)^2 + \frac{\partial^2 N_x}{\partial T \partial P} (T - T_n)(P - P_n) + \frac{\partial^2 N_x}{\partial P^2} (P - P_n)^2 \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 N_x}{\partial S_{io}^2} (S_{io} - S_{ion})^2 + \frac{\partial^2 N_x}{\partial R_{zz}^2} (R_{zz} - R_{zzn})^2 + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial S_{io} \partial R_{zz}} (S_{io} - S_{ion})(R_{zz} - R_{zzn}) \right] + \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial S_{io}} (C - C_n)(S_{io} - S_{ion}) + \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial R_{zz}} (C - C_n)(R_{zz} - R_{zzn}) + \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial S_{io}} (T - T_n)(S_{io} - S_{ion}) + \frac{\partial^2 N_x}{\partial T \partial R_{zz}} (T - T_n)(R_{zz} - R_{zzn})$$



## Представлення відносної похибки нелінійності номінальної функції перетворення



## Характеристика зміни абсолютної адитивної похибки

Оцінено економічний потенціал розробки засобу контролю та генерації озону у регульованих газових середовищах. Проведений технологічний аудит показав, що нова розробка має середній комерційний потенціал. Порівняння нової розробки з аналогом показало, що новий виріб буде краще за аналог по технічним і економічним параметрам, а також якісніше і конкурентоспроможніше.

Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи по кожній з статей витрат складе 34872,24 грн. Загальна ж величина витрат на виконання та впровадження результатів даної НДР буде складати 69744 грн.

Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 2,2 роки при прогнозованому прибутку 214707,33 грн. за три роки.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено засіб контролю концентрації озону у РГС на основі оптико-абсорбційного методу з покращеними метрологічними характеристиками. Основні наукові висновки та результати роботи полягають в такому:

1. Проведено аналіз існуючих систем та методів контролю концентрації озону у РГС. На основі аналізу відомих методів та засобів контролю концентрації озону встановлені їх основні недоліки та вибрано напрямок досліджень.
2. Одержав подальший розвиток метод вимірювального контролю концентрації озону в основній інфрачервоній області та розроблено структурну схему з відкритими вимірювальним та компенсаційним каналами.
3. Вдосконалено математичну модель фотоелектричного вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку, яка враховує паразитні параметри складових елементів фотоприймача, отримано рівняння перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину – значення вихідної напруги фотоприймача та вхідну – значення інтенсивності світлового потоку, що дозволило підвищити достовірність контролю.
4. Проведено аналіз коефіцієнту передачі оптичного вимірювального перетворювача, коефіцієнт поглинання ОЗ у газах та досліджено вплив ширини спектру приймача ІЧ випромінювання на чутливість оптичного каналу газового сенсора.
5. Технічно обгрунтовано реалізацію засобу контролю озону. Розраховано статичні та динамічні характеристики засобу контролю концентрації озону на основі оптико-абсорбційного методу.
6. Розроблено структурну та функціональну схеми засобу контролю концентрації озону та представлено рівняння перетворення вимірювального каналу.
7. Оцінена адекватність розробленої математичної моделі та визначено точність вимірювань концентрації озону.
8. Оцінено економічний потенціал розробки засобу контролю та генерації озону у регульованих газових середовищах. Проведений технологічний аудит показав, що нова розробка має середній комерційний потенціал.

## Апробація результатів магістерської роботи

**Апробація результатів роботи.** Результати роботи обговорювалися на V Міжнародній науково-технічній конференції «ВКДТС-2019». (м. Вінниця).

**Публікації.** Результати роботи опубліковано у збірнику тез доповідей:  
[Дудатьєв І.А., Горбатюк В.В, ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ТА ГЕНЕРАЦІЇ ОЗОНУ У РЕГУЛЬОВАНИХ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ // ВКДТС , 2019, с. 117-118.](#)

Дякую за увагу!