

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«Система автоматизованого контролю та  
керування вмістом вуглекислого газу в  
інкубаторних станціях»**

08-24.МКР.001.00.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,  
групи ЕПА-23мз

спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Владислав КУЧАНСЬКИЙ

Керівник: д.т.н., професор каф. КЕМСК

Василь КУХАРЧУК  
(прізвище та ініціали)

«20» травня 2025 р.

Опонент: д.т.н., доцент каф. ЕСБЕМ

Ваденко О.В.  
«10» серпня 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри КЕМСК

К.т.н., доц. Микола МОШНОРИЗ

(прізвище та ініціали)

«3» серпня 2025 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувача кафедри**

К.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

“18” лютого 2025 року

**ЗАВДАННЯ  
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кучанському Владиславу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Система автоматизованого контролю та керування вмістом вуглекислого газу в інкубаторних станціях»

керівник роботи Кухарчук . В.В. д.т.н., проф. каф. КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” 03 2025 року №97

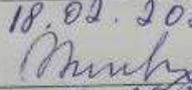
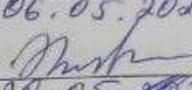
2. Строк подання студентом роботи 03 серпня 2025

3. Вихідні дані до роботи Відомості відносно конструктивного виконання та особливостей роботи інкубаторних станцій, кількість інкубаційних станцій, алгоритми роботи інкубаторів, принцип роботи сенсорів газу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналіз сучасного стану методів і засобів контролю та керування концентрацією вуглекислого газу. Математичні моделі вимірювального контролю концентрації вуглекислого газу. Обґрунтування та вибір мікроконтролера, Економічна частина. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

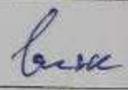
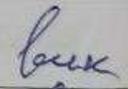
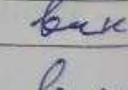
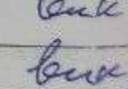
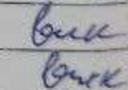
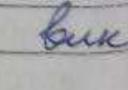
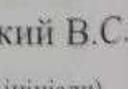
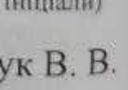
5. Перелік ілюстративного матеріалу: Результати моделювання функції перетворення сенсора концентрації вуглекислого газу, Результати моделювання

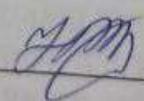
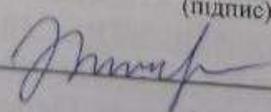
експериментальної статичної характеристики NDIR, Сертифікат Кучанського  
 Владислава про участь у роботі International scientific and practical conference  
 "Science and technology: challenges, prospects and innovations", Результати комп'ютерного моделювання вимірювального  
 каналу концентрації вуглекислого газу  
 7. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кухарчук В. В. д.т.н., професор	18.02.2025 	06.05.2025 
Економічна частина	Шулле Ю.А., к.т.н., доцент	18.02.2025 	20.05.2025 

8. Дата видачі завдання «18» 02 2025 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	18.02.2025	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	06.05.2025	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	20.05.2025	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	20.05.2025	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	20.05.2025	
6	Попередній захист МКР	03.06.2025	
7	Нормаконтроль МКР	03.06.2025	
8	Рецензування МКР	10.06.2025	
9	Захист МКР	23.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Кучанський В.С.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)  
 Керівник роботи \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Кухарчук В. В.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

**УДК:** 528.88+557.502.6

Магістерська кваліфікаційна робота викладена на 105 аркушах формату А4, містить 48 рисунків, 15 таблиць, список використаних джерел включає 54 найменувань.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи контролю рівня вуглекислого газу в інкубаційних станціях на базі мікроконтролерної платформи Arduino Leonardo з використанням сенсорів типу NDIR.

У вступній частині обґрунтовано актуальність теми, зумовлену потребою в забезпеченні стабільного мікроклімату при виведенні пташенят. Розглянуто вплив концентрації CO<sub>2</sub> на фізіологію ембріона та якість інкубації. У теоретичному розділі проаналізовано відомі системи контролю CO<sub>2</sub> та визначено їх переваги й недоліки. Особливу увагу приділено автоматизованим та напівавтоматичним технологіям моніторингу.

У проєктній частині наведено вибір апаратного забезпечення: мікроконтролера ATmega32u4, сенсорів CO<sub>2</sub>, сервоприводів, схему підключення, алгоритм роботи, а також принципову та функціональну блок-схеми. Реалізовано математичну модель перетворення аналогового сигналу в ppm.

Економічна частина містить розрахунки вартості апаратної реалізації системи, порівняльний аналіз з аналогами, обґрунтування доцільності впровадження. Розділ охорони праці охоплює оцінку виробничих ризиків, пожежну безпеку, електробезпеку, вимоги до мікроклімату та ергономіки.

Ключові слова: автоматизація, інкубатор, вуглекислий газ, Arduino Leonardo, ATmega32u4, CO<sub>2</sub>-сенсор, NDIR, мікроклімат, система керування, птахівництво.

## ABSTRACT

The master's qualification thesis is presented on 105 pages of A4 format and includes 48 figures, 12 tables, and a list of 54 references.

The purpose of the work is to develop an automated carbon dioxide concentration control system for incubation stations based on the Arduino Leonardo microcontroller platform using NDIR-type CO<sub>2</sub> sensors.

The introduction substantiates the relevance of the topic, driven by the need to maintain a stable microclimate during chick incubation. The influence of CO<sub>2</sub> concentration on embryo physiology and hatch quality is discussed. The theoretical section provides an overview of known CO<sub>2</sub> control systems, highlighting their advantages and limitations, with a focus on automated and semi-automated monitoring technologies.

The design section presents the selection of hardware components: the ATmega32u4 microcontroller, CO<sub>2</sub> sensors, servo drives, circuit connection schemes, a system operation algorithm, and functional and schematic block diagrams. A mathematical model for converting analog voltage signals into ppm is also implemented.

The economic section includes cost calculations for the system's hardware implementation, a comparative analysis with existing analogs, and justification for the system's feasibility. The occupational safety section covers the assessment of production risks, fire and electrical safety, microclimate parameters, and ergonomic requirements.

**Keywords:** automation, incubator, carbon dioxide, Arduino Leonardo, ATmega32u4, CO<sub>2</sub> sensor, NDIR, microclimate, control system, poultry farming.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>6</b>
<b>1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Особливості об'єкту контролю та керування.....	11
1.2 Локальні системи контролю та керування концентрацією CO <sub>2</sub> в інкубаційній станції.....	16
1.3 Особливості автоматизованих система контролю та керування концентрацією CO <sub>2</sub> в інкубаційних станціях.....	21
1.4 Аналіз відомих методів та засобів контролю концентрації CO <sub>2</sub> .....	25
<b>2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ.....</b>	<b>38</b>
2.1 Розробка та аналіз теоретичної математичної моделі інфрачервоного сенсора концентрації вуглекислого газу.....	38
2.2 Розробка та аналіз емпіричної математичної моделі інфрачервоного сенсора концентрації вуглекислого газу.....	45
2.3 Розробка структурної схеми та аналіз математичних моделей вимірювального каналу концентрації вуглекислого газу.....	54
<b>3. ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР МІКРОКОНТРОЛЕРА.....</b>	<b>77</b>
3.1 Особливості та архітектура побудови мікроконтролера Arduino Leonardo R3.....	78
3.2 Алгоритм функціонування автоматизованої системи контролю та керування вмістом CO <sub>2</sub> .....	83
<b>4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....</b>	<b>90</b>
4.1 Обґрунтування доцільності впровадження.....	90
4.2 Склад системи та джерела витрат.....	90
4.3 Розрахунок заробітної плати.....	91
4.4 Розрахунок амортизації.....	91

4.5 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	92
4.6 Економічна ефективність.....	92
4.7 Висновки.....	92
<b>5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>93</b>
5.1. Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту дослідження.....	95
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	97
5.3 Технічні рішення з пожежної безпеки.....	104
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>109</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>110</b>
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	116
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	120
Додаток В Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	121
Додаток Д Результати моделювання функції перетворення сенсора концентрації вуглекислого газу.....	122
Додаток Е Результати моделювання експериментальної статичної характеристики сенсора NDIR.....	126
ДОДАТОК Ж Сертифікат Кучанського Владислава про участь у роботі International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations”.....	131
ДОДАТОК К Результати комп'ютерного моделювання вимірювального каналу концентрації вуглекислого газу.....	132

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасне птахівництво є стратегічно важливою галуззю аграрного сектору, де технології інкубації відіграють ключову роль у формуванні здорового, продуктивного поголів'я. Якість інкубації визначається комплексом параметрів мікроклімату, серед яких найбільш значущими є: температура повітря, відносна вологість, частота повороту яєць, швидкість повітрообміну, концентрація кисню, концентрація вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>).

Кожен із цих параметрів впливає на фізіологію ембріона: терморегуляцію, дихання, розвиток органів, формування імунної системи та терміни народження. Наприклад, підвищена температура прискорює метаболізм, але може спричинити гіпоксію. Надлишок вологи знижує випаровування і може призвести до асфіксії, тоді як нестача — викликає дегідратацію.

Серед усіх перелічених чинників вуглекислий газ є одним із найменш контрольованих, попри те, що його вплив на ембріональний розвиток є критичним. Відомо, що концентрація CO<sub>2</sub> у межах 1000–3000 ppm стимулює розвиток капілярної сітки, посилює дихання та сприяє синхронному вилупленню. Перевищення цих значень — понад 4000–5000 ppm — викликає гіперкапінію, порушення газообміну, затримку розвитку або загибель ембріона.

Більшість інкубаторних станцій в Україні не мають вбудованих сенсорів для вимірювання CO<sub>2</sub>, а контроль здійснюється вручну або за непрямыми ознаками — графіком провітрювання, температурою або вологістю. Це створює ризик недообліку або затримки реакції при критичних коливаннях газового складу повітря.

Сучасні автоматизовані системи зазвичай обмежуються контролем температури, вологості та повороту яєць. Впровадження моніторингу CO<sub>2</sub> можливе лише в дорогих промислових установках, що унеможлиблює їх широке застосування у фермерських чи дослідницьких інкубаторах.

У зв'язку з цим постає нагальна потреба в розробці доступної, надійної та адаптивної системи автоматичного контролю  $\text{CO}_2$ , яка дозволить:

здійснювати постійний моніторинг та автоматизований контроль концентрації вуглекислого газу керувати вентиляційними заслінками чи сервоприводами для регулювання повітрообміну, зменшити вплив людського фактору на якість виводу.

Використання інфрачервоних сенсорів на основі NDIR-технологій у поєднанні з мікроконтролерами відкритої архітектури (зокрема Arduino Leonardo) забезпечує точність, стабільність та економічну доцільність рішення.

Отже, вуглекислий газ є одним із ключових біологічних параметрів інкубації, який потребує не просто періодичного контролю, а системного, автоматизованого управління для досягнення стабільно високих результатів виводу пташенят.

Мета та завдання дослідження.

**Метою роботи** є підвищення точності інфрачервоних сенсорів та достовірності вимірювального контролю концентрації вуглекислого газу в інкубаторних станціях шляхом реалізації автоматизованого алгоритму керування сервоприводами в режимі реального часу.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірювального перетворення вхідної неелектричної величини концентрації вуглекислого газу в електричну величину – напругу на виході інфрачервоного сенсора.

**Предметом дослідження** є методи та інфрачервоні засоби вимірювального контролю концентрації вуглекислого газу.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

- Проаналізувати існуючі технології автоматизованого контролю  $\text{CO}_2$ ;
- Обґрунтувати вибір сенсорів та виконавчих механізмів для контролю вмісту  $\text{CO}_2$ ;
- Розробити математичні моделі вимірювального перетворення концентрації вуглекислого газу в постійну напругу;
- Розробити структурну та функціональну схеми системи автоматизованого контролю та керування;

- Розробити метрологічні моделі вимірювального каналу концентрації CO<sub>2</sub> в мікропроцесорному виконання;
- Реалізувати алгоритм роботи мікроконтролера для аналізу даних та управління вентиляцією;
- Провести економічне обґрунтування впровадження системи;
- Розробити заходи з охорони праці при роботі з автоматизованим обладнанням.

**Об'єкт дослідження.** Процес автоматизованого контролю та регулювання концентрації CO<sub>2</sub> в інкубаційному середовищі.

**Предмет дослідження.** Методи, алгоритми та апаратні засоби для реалізації автоматизованої системи контролю та керування вмістом CO<sub>2</sub> на базі мікроконтролерної платформи.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставлених завдань у роботі використано методи вимірювального перетворення, математичного моделювання, цифрової обробки сигналів, системного аналізу, а також принципи побудови мікропроцесорних систем та сенсорних мереж.

#### **Наукова новизна.**

Отримала подальший розвиток нелінійна математична модель інфрачервоного вимірювального перетворювача у вигляді експоненційної функції перетворення, що однозначно пов'язує між собою вихідну напругу з вимірюваною концентрацією вуглекислого газу, яка на відмінну від відомих дозволила встановити, що чутливість такого типу вимірювальних перетворювачів в діапазоні зміни вимірюваною величини є величиною змінюваною та є причиною не постійного кроку дискретизації.

Вдосконалено експериментальну статичну характеристику і подано її у вигляді полінома першого порядку, яка на відміну від відомих дозволяє оцінити числові значення як адитивної так і мультиплікативної складових похибки, вилучення та корегування яких з результатів вимірювання дозволило зменшити відносну похибку на початку діапазону вимірювання з 25% практично до нуля.

#### **Практичне значення.**

Отримано рівняння чутливості, швидкості її зміни, номінальну функцію перетворення та аналітичну залежність для оцінювання похибки нелінійності, які і є основними статичними метрологічними характеристиками сенсора концентрації вуглекислого газу.

Розроблено структурну і функціональну схеми системи автоматизованого контролю і керування концентрацією CO<sub>2</sub> в режимі реального часу протікання технологічного процесу інкубаційної станції.

В середовищі програмного забезпечення Micro Cap 9 здійснено комп'ютерне моделювання вимірювального каналу концентрації CO<sub>2</sub> і підтверджено його працездатність.

Оцінено основні статичні метрологічні характеристики мікропроцесорного вимірювального каналу концентрації вуглекислого газу у вигляді рівнянь перетворення і чутливості, похибки квантування, нижньої та верхньої меж вимірювання.

Запропоновано автоматизований алгоритм корегування адитивної похибки, який здійснюють безпосередньо в процесі моніторингу концентрації CO<sub>2</sub> в режимі реального часу що дозволяє зменшити її практично до нуля.

Результати дослідження можуть бути впроваджені в практику сучасного птахівництва як у масштабних інкубаторних станціях, так і в невеликих фермерських господарствах. Система дозволяє знизити залежність від людського фактору, підвищити енергоефективність та забезпечити стабільні умови для інкубації.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

**Структура і обсяг роботи.** Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

**Апробація і публікації.** Результати роботи доповідалися і опубліковані у вигляді тез доповідей на двох науково-технічних конференціях:

1. Кухарчук В.В., Кучанський В.С. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ІНФРАЧЕРВОНИМИ СЕНСОРАМИ ГЕНЕРАТОРНОГО ТИПУ // The 7th International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations” (February 26-28, 2025) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2025. 412 p. ISBN 978-4-9783419-4-5.–P.108-116.

Сертифікат, що підтверджує участь в даній конференції наведено в додатку В – (с.128).

2. Кухарчук В.В., Кучанський В.С. АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІНФРАЧЕРВОНИХ СЕНСОРІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ // LIV ВНТКП ВНТУ-2025 LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2025), <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2025/paper/view/23782>

# 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

## 1.1 Особливості об'єкту контролю та керування

Населення світу стрімко зростає. За прогнозами ООН, до 2050 року воно сягне 9,7 мільярда осіб. Це означає, що глобальний попит на продукти харчування, особливо на високобілкові джерела, такі як птиця, зростатиме щороку. Проблема в тому, що традиційні методи птахівництва стають дедалі менш ефективними для задоволення цього попиту. Інкубатори забезпечують контрольований процес відтворення птиці, що дозволяє виробникам підтримувати стабільність обсягів виробництва незалежно від зовнішніх обставин. Зміна клімату спричиняє значні коливання температури, вологості та інших факторів, які традиційно впливали на природний цикл розмноження птиці. У таких умовах інкубатори виступають як надійне рішення для забезпечення оптимальних умов розвитку ембріонів. Вони дозволяють зменшити вплив кліматичних коливань та підтримувати сталість виробництва. Птахівництво потребує значних обсягів енергії, води та кормів. Зменшення природних ресурсів змушує виробників шукати інноваційні підходи для зниження витрат. Сучасні інкубатори, оснащені енергоефективними системами, допомагають оптимізувати використання ресурсів.

Інкубатори створюють стабільне середовище, у якому всі параметри – температура, вологість, рівень CO<sub>2</sub> – регулюються автоматично. Це дозволяє уникнути проблем, пов'язаних із сезонними коливаннями або несприятливими погодними умовами.

Параметри інкубаторів та їхній вплив на якість виводу курчат:

**Температура.** Температура є критичним параметром інкубації. Вона підтримується в межах 37,5–38°C, оскільки навіть незначні відхилення можуть негативно вплинути на розвиток ембріонів. Наприклад, надмірне нагрівання

може призвести до перегріву, тоді як недостатнє – до уповільнення метаболічних процесів. Сенсори температури (термопари та терморезистори) використовуються для вимірювання та підтримання стабільного температурного режиму. Вони бувають кількох типів, серед яких найбільш поширені термопари типу К та термістори.

**Вологість.** Оптимальний рівень вологості залежить від етапу інкубації. На початкових стадіях вологість має становити близько 55%, щоб запобігти висиханню мембран. На останніх етапах вона підвищується до 70%, щоб полегшити вилуплення курчат. Сучасні інкубатори використовують ємнісні сенсори, які вимірюють рівень вологості за допомогою змін ємності на поверхні. Це дозволяє підтримувати стабільний рівень вологи у всьому інкубаторі.

**Циркуляція повітря.** Рівномірний розподіл температури та газів усередині інкубатора забезпечується вентиляційними системами. Відсутність належної циркуляції може призвести до локального перегріву або накопичення CO<sub>2</sub>. Сенсори, такі як EE872, контролюють концентрацію вуглекислого газу. Їх принцип роботи базується на інфрачервоному аналізі, який дозволяє точно визначати рівень CO<sub>2</sub> і миттєво реагувати на будь-які відхилення.

#### **Автоматизація як необхідність: завдання і переваги**

Завдання автоматизації - автоматизація в інкубаторах виконує кілька важливих завдань, серед яких:

Моніторинг параметрів середовища: Системи автоматизації постійно контролюють температуру, вологість, рівень кисню та CO<sub>2</sub>, гарантуючи стабільність умов інкубації.

Швидке реагування на відхилення: У разі виходу будь-якого параметра за межі норми система автоматично вносить корективи для уникнення ризиків. Наприклад, якщо температура підвищується, вмикаються системи охолодження.

Мінімізація втручання людини: Завдяки автоматизації знижується необхідність ручного налаштування інкубатора, що зменшує ризики помилок.

Переваги автоматизації:

Економія часу: Автоматизовані системи виконують безліч операцій без участі людини, дозволяючи працівникам зосередитися на інших важливих завданнях.

Точність: Датчики та системи управління забезпечують високу точність у підтриманні заданих параметрів.

Ефективність: Автоматизація знижує витрати на енергію, воду та інші ресурси завдяки оптимізації роботи обладнання.

Дистанційний контроль: Використання IoT дає змогу керувати інкубатором через смартфони або комп'ютери, що особливо зручно для великих підприємств.

### **Види інкубаторів:**

Є безліч інкубаторів як ручних так і автоматичних. Є ручні інкубатори з ручним переворотом яйця такі як: Інкубатор ручний Рябушка Turbo 70 з вентилятором. Даний інкубатор вміщає в себе 70 курячих яєць та автоматично підтримує температуру за допомогою терморегулятора, так в ньому є вентилятор для більш кращої циркуляції повітря та температури. Але мінусом даного інкубатора є те, що він ручний та не вимірює і не підтримує самостійно рівень вологи, що є теж дуже важливо, а для того, щоб яйце прогрівалось рівномірно вам потрібно його самостійно декілька раз за день перевертати. Тобто такий варіант теж не підходить для підприємства.

Є інкубатори з механічним переворотом, система інкубатора точно така ж, але ви механічно можете перевернути одразу всі яйця, тобто вам також потрібно самому перевіряти його, доливати воду та перевертати яйця.

Найкращий варіант це інкубатор з автоматичним перевертанням яйця, такі теж є але нюанс в тому, що вам також потрібно спостерігати за рівнем вологи в середині та вони мають малу ємність для закладки яйця.

. Весь процес інкубації займає всього 21 день. Весь процес інкубації розділяється на декілька етапів:

1.1 Перевірка інкубаційного яйця на дефекти, за допомогою просвічування.

1.2 Закладка інкубаційного яйця у інкубатор.

### 1.3 Перевірка яйця на пошкодження та наявність ембріонів.

Інкубатори автоматично підтримують температурні режими для повноцінного вилуплення курчат. Все це вдається робити завдяки продуманій конструкції та великій кількості датчиків які постійно спостерігають за станом машини, Дуже важливо, щоб всі датчики були вірно відкалібровані, щоб інкубатор повноцінно працював, від кожного елемента інкубатора залежить відсоток виведення курчат.

На (рис. 1.1) наведено структурну схему інкубатора.

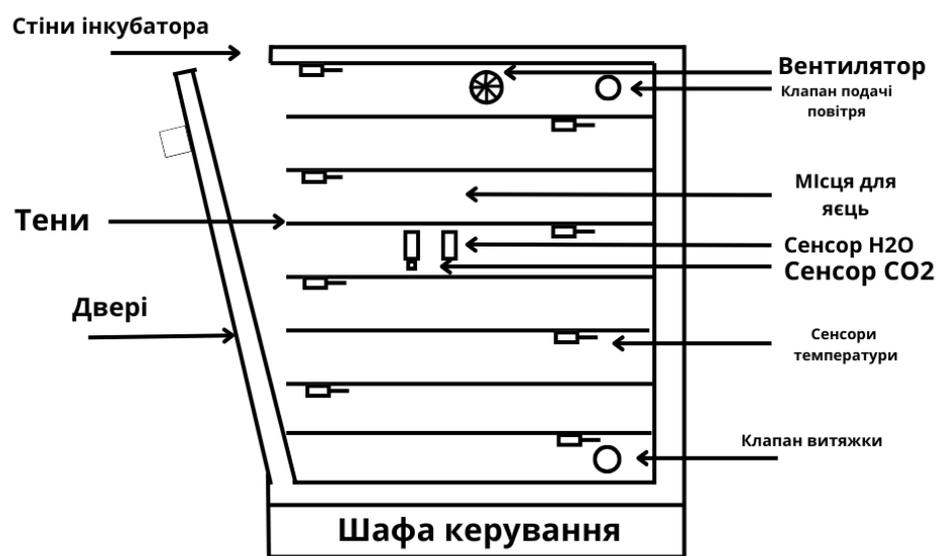


Рисунок 1.1 – Структурна схема інкубатора вигляд зверху.

На даній схемі можна побачити вигляд самого інкубатору зверху, сенсори температури ( 8 шт.), вуглекислого газу та вологості. Тени ( 8 шт.) які нагрівають та охолоджують камеру інкубатора, місця для закладки яйця. Також циркуляційний вентилятор який циркулює все повітря яке знаходиться в камері, клапана подачі та витяжки повітря, для того, щоб в інкубаторі був кисень.

В загальному кожен датчик який знаходиться у інкубаторі грає дуже велику роль в процесі інкубації, але датчик вуглекислого газу можна рахувати як одним із самих головних, адже якщо, щось піде не так в роботі інкубатора, в

будь-якому випадку рівень вуглекислого газу почне зростати, що призведе до відсутності кисню . Саме тому до датчиків CO<sub>2</sub> потрібна найбільша увага.

### **Особливості контролю інформативного параметру CO<sub>2</sub>**

Для початку потрібно визначитись звідки взагалі в машині береться CO<sub>2</sub>. Як нам відомо живі істоти вдихають кисень та видихають вуглекислий газ. Тому можна задати питання звідки тоді береться вуглекислий газ в інкубаторі адже там звичайні яйця. Так насправді коли інкубатор тільки запускається в роботу там дійсно на перших дня знаходиться звичайне яйце, але пізніше в цьому яйці розпочинається процес створення нового життя. Курча яке ще навіть не повністю сформоване вже буде виділяти близько 0.01 ppm а це вже 2000 ppm, в той час як норма для дихання 350 – 400 ppm. А на 20 та 21 дні інкубації рівень CO<sub>2</sub> досягає 3 500 ppm. Тому для того, щоб курчата завжди отримували постійний доступ до кисню встановлюється датчик вуглекислого газу.

Для більш кращого розуміння нам потрібно зрозуміти принцип роботи та види датчиків CO<sub>2</sub>. Що таке вуглекислий газ? Під такою поширеною назвою відома хімічна речовина діоксид вуглецю, або двоокис вуглецю. Це безбарвний, без запаху, негорючий і нетоксичний газ, життєво необхідний на Землі.

Яка формула вуглекислого газу? Діоксид вуглецю складається з одного атома вуглецю (C) і двох атомів кисню (O). Його хімічна формула – CO<sub>2</sub>.

В атмосфері планети CO<sub>2</sub> становить 0,04%. Але він у 1,5 рази важчий за суміш повітря, що складається з азоту, кисню, водню та інших газів. За температури -73,8 °C він переходить у твердий стан – сухий лід. При підвищенні температури не плавиться (минає рідку стадію), відразу випаровується. При підвищенні тиску до 60 атмосфер вуглекислий газ перетворюється на рідину. Це зручно для його зберігання в металевих балонах.

З безперервним розвитком науки і техніки, підвищенням рівня життя людей і збільшенням уваги людей до охорони навколишнього середовища, кількісний моніторинг і контроль вуглекислого газу став зростаючим попитом у кондиціонуванні повітря, сільському господарстві, медичному лікуванні, автомобілів і захисту навколишнього середовища . Датчики вуглекислого газу

широко використовуються в промисловості, сільському господарстві, національній обороні, медицині та охороні навколишнього середовища, аерокосмічній та інших галузях.

Кожна речовина, як і молекули вуглекислого газу, має свій характерний яскраво-лінійний спектр і, відповідно, спектр поглинання. Коливання решітки керамічних матеріалів і рух електронів мають ефект перешкоди, температура підвищується, коливання решітки посилюються, збільшується амплітуда, посилюється дія заважаючих електронів. Відповідно до теорії селективного поглинання газу, коли довжина хвилі випромінювання джерела світла збігається з довжиною хвилі поглинання газу, відбудеться резонансне поглинання, і його інтенсивність поглинання пов'язана з концентрацією газу. Концентрацію газу можна виміряти шляхом вимірювання інтенсивності поглинання світла.

## **1.2 Локальні системи контролю та керування концентрацією CO<sub>2</sub> в інкубаційній станції**

На сучасному етапі розвитку птахівництва інкубаційні станції залишаються важливим компонентом процесу розведення птиці. Важливою умовою успішного розвитку ембріонів є підтримання стабільного газового складу повітря, зокрема концентрації вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>). Однак, більшість інкубаторних установок, які застосовуються на практиці, не оснащені датчиками для вимірювання рівня CO<sub>2</sub>.

Провітрювання в таких інкубаторах виконується вручну під час технологічних операцій, наприклад, під час перевертання яєць. Такий підхід є застарілим, неефективним і має низку недоліків, серед яких:

Нерегулярність провітрювання: вентиляція відбувається за графіком перевертання яєць, а не за реальними потребами газового середовища.

Підвищення рівня CO<sub>2</sub>: у періоди між провітрюваннями концентрація CO<sub>2</sub> може досягати критичних значень, що негативно впливає на розвиток ембріонів.

Людський фактор: робота персоналу не завжди виконується вчасно або коректно, що може спричинити перевищення допустимих значень CO<sub>2</sub>.

Наслідки відсутності систем контролю CO<sub>2</sub>

Недостатня вентиляція або запізніле провітрювання призводить до таких негативних наслідків:

Порушення розвитку ембріонів: підвищений рівень CO<sub>2</sub> уповільнює розвиток курчат і збільшує кількість дефектів.

Зменшення відсотка вилуплення: при тривалому перевищенні допустимого рівня CO<sub>2</sub> (понад 0,6 %) кількість здорових курчат зменшується на 15–20 %.

Підвищення ризику захворювань: недостатнє провітрювання створює сприятливі умови для розвитку патогенної мікрофлори.

У (табл. 1.2.1) відображено Вплив концентрації CO<sub>2</sub> на розвиток ембріонів.

Таблиця 1.2.1 Вплив концентрації CO<sub>2</sub> на розвиток ембріонів

Рівень CO <sub>2</sub> (%)	Вплив на розвиток ембріонів
0,3	Оптимальний розвиток, нормальний газообмін
0,4	Легка затримка розвитку при тривалому впливі
0,5	Помітне уповільнення розвитку ембріонів
0,6 і більше	Збільшення смертності, зменшення маси курчат

Таким чином, наявні методи управління вентиляцією, що базуються виключно на втручанні людини, не забезпечують належних умов для оптимального розвитку ембріонів. Потреба у впровадженні напівавтоматичних систем є обґрунтованою та актуальною.

Загальна характеристика системи:

Напівавтоматична система управління концентрацією вуглекислого газу в інкубаційних станціях є проміжним рішенням між повністю ручним та повністю автоматизованим контролем параметрів газового середовища. Її основне завдання – своєчасно інформувати оператора про перевищення допустимого рівня CO<sub>2</sub>, що дає змогу персоналу вчасно реагувати на ситуацію.

Основні функції системи:

Моніторинг концентрації вуглекислого газу у реальному часі.

Контроль роботи вентиляційних систем під контролем оператора.

Конструкція напівавтоматичної системи - напівавтоматична система управління концентрацією CO<sub>2</sub> включає такі основні компоненти:

1. Датчик вуглекислого газу

Принцип роботи: вимірює концентрацію CO<sub>2</sub> за допомогою інфрачервоного випромінювання, яке поглинається молекулами CO<sub>2</sub>.

Розташування: встановлюється у центральній частині інкубатора для отримання репрезентативних показників.

2. Контрольний блок

Оператор: обробляє сигнали від датчика, порівнює з граничними значеннями.

Особливість: обладнаний цифровим дисплеєм для відображення актуальних значень концентрації CO<sub>2</sub>.

3. Вентиляційна система з ручним керуванням

Механізм: клапан, який відкривається вручну оператором після перевищення рівня CO<sub>2</sub>.

Особливість: простота у використанні без додаткових електронних модулів.

На ( рис. 1.2) зображено схему напівавтоматичної системи контролю CO<sub>2</sub>.



Рисунок 1.2– Схема напівавтоматичної системи контролю CO<sub>2</sub>

Алгоритм функціонування напівавтоматичної системи складається з кількох послідовних етапів:

1. Вимірювання рівня CO<sub>2</sub>

Датчик знімає показники концентрації газу кожні 30 секунд.

2. Обробка отриманих даних

Оператор порівнює отримані значення з допустимим рівнем (наприклад, 0,4 %).

3. Реакція оператора

Працівник інкубаційної станції відкриває вентиляційні клапани для зниження концентрації CO<sub>2</sub>.

Переваги, недоліки та перспективи впровадження напівавтоматичної системи. У традиційних інкубаційних станціях контроль за концентрацією вуглекислого газу відбувається вручну. Працівник періодично перевертає яйця, і в цей час відбувається провітрювання камери. Проте такий підхід не враховує реальні потреби системи у вентиляції, адже газове середовище може досягати критичних значень задовго до запланованого провітрювання.

У ( табл. 1.2.2) проведено порівняння функціональних можливостей систем керування.

Таблиця 1.2.2 - Порівняння функціональних можливостей систем керування:

Критерій	Ручна система	Напівавтоматична система
Час реакції на перевищення	Від кількох годин до доби	Миттєвий реакція при перевищенні норм
Трудозатрати	Високі (постійний контроль)	Середні (втручання лише при потребі)
Ефективність провітрювання	Низька через нерегулярність	Висока завдяки моніторингу
Витрати на впровадження	Мінімальні	Середні (встановлення датчиків)

Як видно з таблиці, впровадження напівавтоматичної системи дозволяє оптимізувати процес вентиляції, скоротити витрати робочого часу та покращити якість інкубації за рахунок стабільних показників газового складу.

Переваги впровадження напівавтоматичної системи:

1. Підвищення ефективності інкубації. Своєчасний контроль концентрації CO<sub>2</sub> забезпечує оптимальні умови для розвитку ембріонів, що сприяє підвищенню відсотка вилуплення курчат на 10–15 %.
2. Зниження людського фактору. Оператор побачить про необхідність провітрювання, що мінімізує ризик несвоєчасних дій.
3. Оптимізація мікроклімату. Підтримка стабільних параметрів газового середовища сприяє покращенню якості інкубаційного процесу.
4. Економічна ефективність. Впровадження напівавтоматичної системи, хоч і потребує початкових витрат, з часом дає змогу зменшити витрати на енергоресурси та підвищити продуктивність інкубаційних станцій.

Недоліки та виклики при впровадженні системи:

1. Початкові фінансові витрати.

Придбання датчиків, контрольних модулів і сигнальних пристроїв потребує додаткових інвестицій, що може бути суттєвим бар'єром для невеликих підприємств.

2. Потреба у калібруванні датчиків.

Датчики CO<sub>2</sub> з часом можуть втрачати точність і потребують періодичного калібрування для забезпечення коректних результатів вимірювань.

3. Залежність від людського фактора.

Система залишається напівавтоматичною, тому її ефективність залежить від дисциплінованості оператора, який має реагувати на сигнали.

4. Можливі збої у роботі електронних компонентів.

В умовах підвищеної вологості або забруднення повітря датчики можуть давати похибки, що вимагає додаткових заходів із технічного обслуговування.

*Перспективи розвитку напівавтоматичних систем:*

1. Перехід до повністю автоматизованих систем.

Наступним кроком розвитку стане впровадження повністю автоматичних систем контролю CO<sub>2</sub> з можливістю дистанційного моніторингу через інтернет (технологія IoT).

## 2. Інтеграція з іншими системами інкубатора.

Об'єднання системи контролю CO<sub>2</sub> з модулями температури, вологості та вентиляції дозволить створити єдину інтелектуальну систему керування інкубаційним процесом.

## 3. Оптимізація енерговитрат.

Сучасні системи можуть бути оснащені енергозберігаючими компонентами, зокрема датчиками з низьким енергоспоживанням та системами рекуперації тепла.

Запропонована напівавтоматична система контролю CO<sub>2</sub> є ефективним кроком до модернізації інкубаційних станцій. Вона дозволяє підтримувати оптимальний мікроклімат без значних витрат на повну автоматизацію процесу. Аналіз переваг і недоліків системи свідчить про її економічну доцільність, а перспективи розвитку відкривають можливості для подальшої оптимізації процесів інкубації.

### **1.3 Особливості автоматизованих система контролю та керування концентрацією CO<sub>2</sub> в інкубаційних станціях**

Автоматизована система контролю і управління концентрацією CO<sub>2</sub> в інкубаційній станції має головну перевагу перед напівавтоматизованню – це відсутність втручання людини у процес інкубації, що призводить до підняття якості провітрювання у камері, все це веде до збільшення якості виводу курчат.

На ( рис. 1.3) наведено структурну схему керування інкубатором.

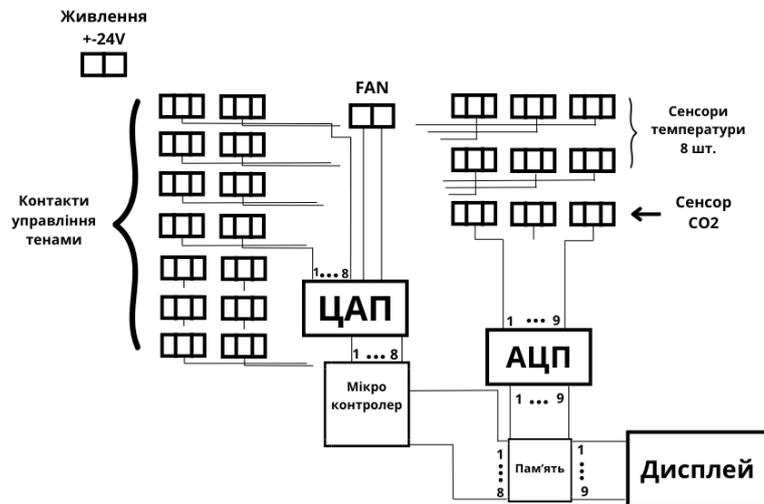


Рисунок 1.3 – Структурна схема керування інкубатором.

Автоматизована система буде включати в себе мікроконтролер, який самостійно буде обробляти інформацію яка приходить з датчика CO<sub>2</sub> та відкривати клапана подачі повітря на вентиляції. Загалом структурна схема інкубатора буде мати вигляд який приведено на рисунку 1.3

На рисунку 1.3 ми бачимо схему керування. Сенсор CO<sub>2</sub> та сенсори температури (8 шт) з яких аналоговий вихідний сигнал потрапляє на АЦП (аналого-цифровий перетворювач). АЦП перетворює сигнал у двійковий код, та передає його у пам'ять яка записує весь код. Пам'ять у свою чергу передає перетворені сигнали на дисплей для відображення інформації по рівню CO<sub>2</sub> та на мікроконтролер, який обробляє інформацію з датчиків температури та передає двійковий код на ЦАП (цифро-аналоговий перетворювач). ЦАП передає вже готовий аналоговий сигнал на порти керування тенами. Мікроконтролер має задану уставку температури, та в залежності від потреби нагрівання чи охолодження керує тенами для підтримки температурного режиму інкубатора. Сенсор CO<sub>2</sub> в даній системі грає роль лише датчика за яким спостерігає оператор, та втручається в критичні моменти, як вже описано вище це має свої недоліки. Тому автоматизована система буде містити свій незалежний мікроконтролер який дасть змогу керувати вуглекислим газом без втручання людини.

Переваги Автоматизованої системи контролю і управління концентрацією CO<sub>2</sub> в інкубаційній станції:

1. Підвищення відсотка вилуплення пташенят. Автоматичний контроль рівня CO<sub>2</sub> забезпечує стабільний мікроклімат в інкубаторі, що сприяє правильному розвитку ембріонів і підвищенню відсотка вилуплення на 10–20 %.

2. Оптимізація газообміну. Система постійно аналізує концентрацію CO<sub>2</sub> та своєчасно коригує подачу свіжого повітря, запобігаючи кисневому голодуванню або накопиченню надмірної кількості вуглекислого газу.

3. Зниження людського фактору. Автоматизація процесу виключає необхідність ручного контролю і реагування оператора, що мінімізує ризик помилок і затримок у вентиляції.

4. Економія енергоресурсів. Оптимальне керування вентиляцією дозволяє зменшити витрати на електроенергію, оскільки вентилятори працюють лише за необхідності, а не за фіксованим графіком.

5. Гнучке налаштування параметрів. Користувач може встановлювати оптимальні значення концентрації CO<sub>2</sub> для різних стадій розвитку ембріонів, що дозволяє адаптувати систему до різних видів птиці.

6. Інтеграція з іншими автоматизованими системами. Система може працювати спільно з контролем температури, вологості, вентиляції та повороту яєць, створюючи повністю автоматизоване керування інкубаційним процесом.

7. Зменшення стресу для ембріонів. Автоматичне провітрювання забезпечує плавні зміни мікроклімату без різких коливань параметрів, що сприяє здоровому розвитку ембріонів.

8. Зменшення ризиків захворювань і зараження. Оптимальна вентиляція зменшує ймовірність розвитку патогенних мікроорганізмів у повітрі інкубатора, що позитивно впливає на здоров'я пташенят.

На (рис. 1.4) Наведено вигляд автоматизованої системи контролю CO<sub>2</sub>.

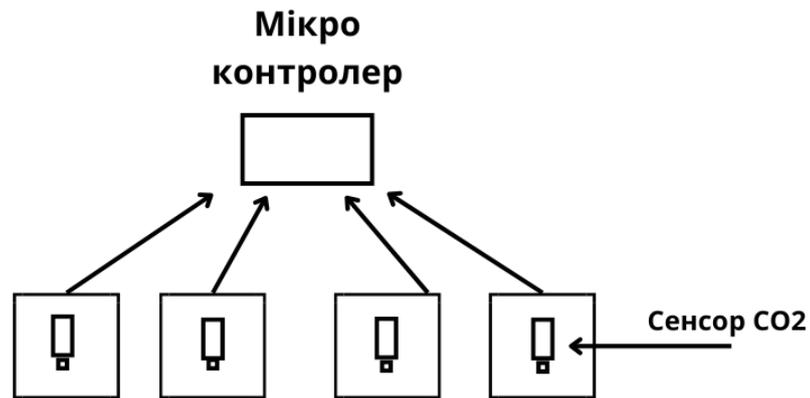


Рисунок 1.4 – Автоматизована система контролю CO<sub>2</sub>.

Завдяки нашій системі ми змогли досягнути заміни людини та людського фактору простим мікроконтролером.

### Висновки

Автоматична система управління рівнем вуглекислого газу в інкубаторі є важливим технологічним рішенням, яке значно покращує ефективність процесу інкубації. Вона дозволяє досягти стабільних умов розвитку ембріонів завдяки безперервному моніторингу та автоматичному регулюванню концентрації CO<sub>2</sub>. Це усуває основні проблеми традиційних інкубаційних систем, де вентиляція здійснюється вручну або за фіксованим графіком, що може призводити до критичних коливань газового середовища.

Однією з головних переваг автоматичної системи є підвищення відсотка вилуплення пташенят. Завдяки точному контролю мікроклімату відбувається зменшення стресових факторів для ембріонів, що забезпечує більш рівномірний розвиток і зменшує кількість загиблих зародків. Оптимальна концентрація CO<sub>2</sub> сприяє правильному газообміну, що є ключовим фактором для формування здорових пташенят.

Ще одним значним досягненням є зменшення впливу людського фактору. Традиційні методи передбачають постійний контроль і ручне регулювання провітрювання, що може бути ненадійним і залежати від кваліфікації персоналу. Автоматична система працює автономно, гарантуючи

своєчасне провітрювання та оптимальні умови без необхідності постійного втручання оператора.

Окрім цього, система дозволяє економити ресурси. Використання інтелектуальних алгоритмів управління дає змогу зменшити енергоспоживання, оскільки вентиляція вмикається лише при необхідності. Це також зменшує знос вентиляційного обладнання та забезпечує довговічність роботи системи.

Окрім технологічних переваг, автоматизація процесу управління CO<sub>2</sub> також знижує ризики виникнення захворювань серед пташенят. Оптимальне провітрювання запобігає накопиченню надмірної вологості та сприяє зниженню концентрації патогенних мікроорганізмів, що значно покращує загальний санітарний стан інкубатора.

Таким чином, впровадження автоматичної системи управління рівнем CO<sub>2</sub> в інкубаторі є необхідним кроком для підвищення продуктивності птахівництва, зниження експлуатаційних витрат та покращення якості інкубаційного процесу. Це не лише технологічне покращення, але й важливий елемент оптимізації виробничих процесів у сучасному аграрному секторі.

## **1.4 Аналіз відомих методів та засобів контролю концентрації CO<sub>2</sub>**

На сьогоднішній день існує багато видів газових сенсорів. Їх можуть будувати на основі як традиційних так і нетрадиційних напівпровідникових елементів. Також вони мають низку особливостей за якими їх можна розрізнити. Але найчастіше щоб класифікувати газові сенсори використовують один із наступних методів: за хімічним складом, за типом чутливості, за принципом дії або за методом контролю.

### **1.4.1 Газові сенсори за типом чутливості**

Одним з видів розподілу газових сенсорів є їх класифікація за типами чутливості. Різниця полягає у тому, на якій основі сенсори отримують інформацію про середовище і вплив газу на нього та як взаємодіють з ними.

Таким чином їх розрізняють на: каталітичні, електрохімічні, механічні, теплопровідні, акустичні, оптичні, тощо. Кожен з цих видів має певні переваги та недоліки через їх характеристики та вид даних, що аналізуються

Каталітичні сенсори вимірюють зміну кількості виділеної теплоти при каталітичній реакції окиснення аналізованого газу. Вони зазвичай складаються з двох ключових компонентів: каталізатора та нагрівального елемента. Матеріал каталізаторів підбирають відносно аналізованого газу. В основному ці сенсори використовуються для газів, які більш активні за низької температури.

Теплопровідні сенсори (рис.1.5) досліджують швидкість теплових витрат у середовищі газів з різною теплопровідністю.

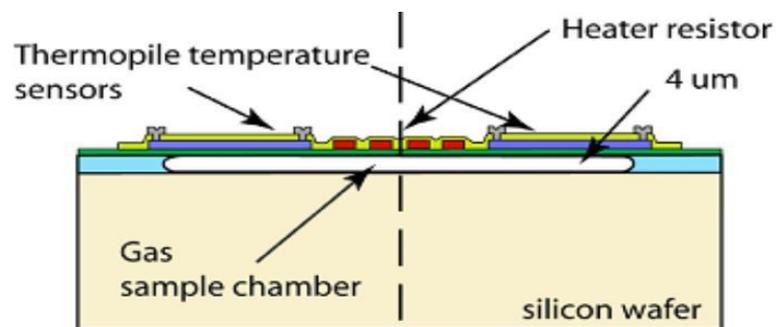


Рисунок 1.5 - Приклад схеми теплопровідного газового сенсора [4]

Вони часто використовуються у промисловості, системах контролю навколишнього середовища, пристроях безпеки та домашніх приладах, таких як газові детектори, датчики витoku газу, контролери вентиляції та інших. Одним з недоліків цих газових сенсорів є те, що вони вимагають калібрування для конкретних газів і повинні бути використані відповідно до вказівок виробника для досягнення точних результатів вимірювань [3].

Механічні сенсори виявляють наявність та зміну концентрації газів на основі механічних властивостей або ефектів, викликаних взаємодією з газом, наприклад зміну об'єму металу під час адсорбції газів фіксують такими сенсорами.

Акустичні газові сенсори використовують звукові хвилі для виявлення та аналізу газів. Вони працюють на основі принципу зміни швидкості звуку у газі при взаємодії з іншими газами. Коли газ взаємодіє з акустичним сенсором,

він змінює швидкість звуку середовищі, що впливає на характеристики звукової хвилі.

### **1.4.2 Газові сенсори за фізико-хімічним складом**

За фізико-хімічним складом газові сенсори загалом поділяються на 6 категорій: резистивні, електрохімічні, на основі МДН-структур, з бар'єром Шотткі, чутливі до змін маси та оптичні. Кожна з цих категорій має свої розділення в залежності від будови, призначення та методу, яким визначають концентрацію газу.

### **1.4.3 Резистивні газові сенсори**

Резистивні газові сенсори - це тип газових детекторів, які вимірюють зміну електричного опору напівпровідника для виявлення та вимірювання концентрації газів. Вони ґрунтуються на зміні електричних властивостей матеріалу сенсора при взаємодії з газами.

Як слідує із назви, сенсори на напівпровідникових окисах металу використовують їх у якості чутливого матеріалу. Для цього застосовують наступні сполуки:  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_2$  тощо. При хемосорбції кисню на поверхні таких напівпровідників утворюється локальний заряд внаслідок захоплення електронів газу. Такий процес є причиною збіднення приповерхневої області оксидів, що суттєво знижує повну провідність напівпровідників. При сорбції іншого газу, який каталітично взаємодіє з киснем провідність суттєво збільшується. Швидкість і зворотність цих процесів сильно залежить від температури [2].

На (рис. 1.6) наведено приклад схеми резистивного газового сенсора.

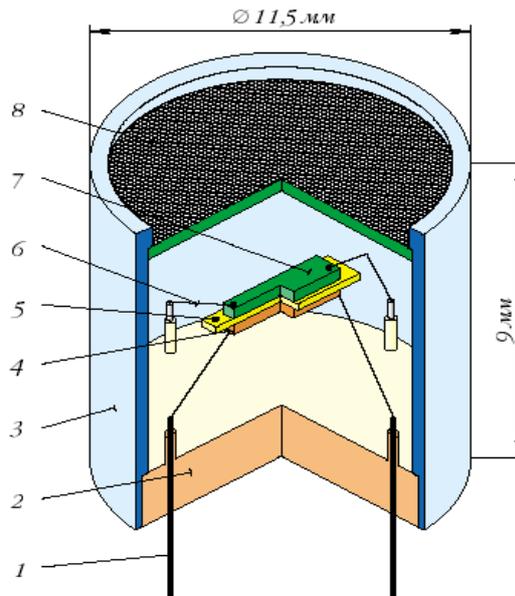


Рисунок 1.6 - Приклад схеми резистивного газового сенсора [3]:

1 – електровиводи, 2 – скляна панель, 3 – металевий корпус, 4 – нагрівач, 5 – підкладка, 6 – проволока, 7 – чутливий елемент, 8 – вибухозахисна металева сітка.

Найчастіше чутливим матеріалом у органічних напівпровідниках резистивного типу використовується плівка фталоціанінів - кільцевих пігментів з центральним металевим іоном, найчастіше металом перехідного ряду. Такі матеріали мають високу хімічну і термічну стійкість. Вони є напівпровідниками р- типу, а їх провідність сильно залежить від кисню. Таким чином у присутності газів, у яких спорідненість до електрона більше, ніж у кисню провідні здатності фталоціанінових плівок змінюється. Найкраще такі сенсори виявляють присутність  $\text{NO}_2$ , а також використовуються для детектування галогенів та галогеновмісних газів. Сенсори на органічних напівпровідниках модифікуються легуванням плівок різними важкими металами, що підвищує чутливість до конкретних газів і знижує її для інших.

Одна із конструкцій каталітичних сенсорів (рис 1.7) фіксує зміну опору плівки каталізатора, або розміщеного поблизу тонкого платинового дроту, тому за хімічним складом їх зазвичай відносять до резистивних сенсорів, але можливі й інші варіації.

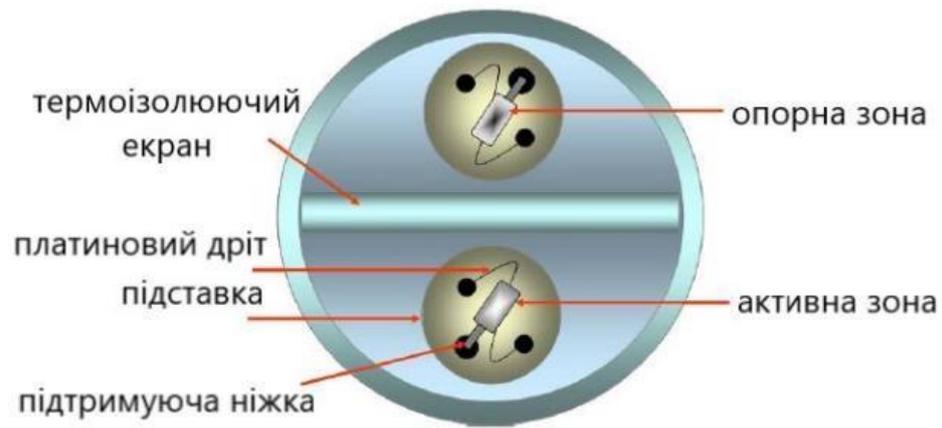


Рисунок 1.7 - Приклад схеми каталітичного газового сенсора [5]

#### 1.4.4 Електрохімічні газові сенсори

Дані, які отримують електрохімічні сенсори отримуються на основі зміни потенціалу електродів або величини електричного струму внаслідок окисно-відновних реакцій під впливом газу, що розташований на електродах електрохімічних комірок.

Іоноселективні електроди використовують іоноселективні мембрани для виявлення певних газів. Їх чутливість проявляється на основі принципу, що певні гази можуть взаємодіяти з іонами в мембрані, що викликає зміну електричних властивостей сенсора: коли газ потрапляє на поверхню такої мембрани, певні іони газу починають взаємодіяти з іонофорами в мембрані. Ця взаємодія може мати як фізичний, так і хімічний прояв, і призводить до зміни електричних властивостей мембрани.

Ферментні електроди є модифікацією іоноселективних. У шарі іммобілізованого ферменту протікає ферментативна реакція, внаслідок чого досліджуване середовище з газом відокремлюється від іоноселективного електрода. Таким чином утворюються продукти ферментивної реакції, що і є об'єктами дослідження.

Принцип роботи амперометричних газових сенсорів (рис. 1.8) базується на можливості певних газів взаємодіяти з поверхнею електрода, викликаючи

електрохімічні реакції чи зміну провідності електрода. Такі зміни можуть бути виміряні як зміна електричного струму, що протікає через амперометричний електрод. Для роботи газового амперометричного сенсора, на поверхню електрода наноситься функціональне покриття або специфічний каталізатор. Цей каталізатор або покриття зазвичай взаємодіє з цільовим газом, викликаючи електрохімічні реакції або зміни провідності, в залежності від концентрації газу в середовищі.

На основі амперометричних сенсорів застосовуються і сенсори на твердих електролітах (рис. 1.8). Такі сенсори здебільшого визначають в середовищі вміст кисню або окисів сірки.

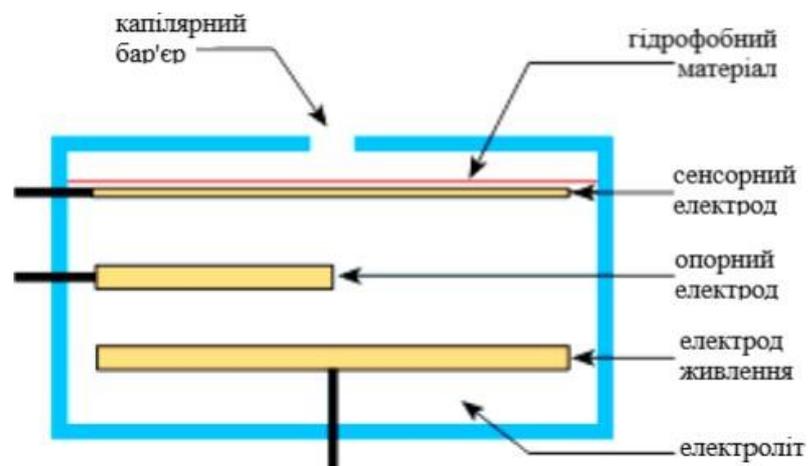


Рисунок 1.8 - Приклад схеми електрохімічного газового сенсора [6]

#### 1.4.5 Газові сенсори на основі МДН-структур

МДН-прилади засікають зміну концентрації носіїв заряду напівпровідника в приповерхневій області через вплив прикладеної напруги. Таким чином їх використовують у тому числі як газові сенсори. МДН-конденсатори визначаються зсувом  $C-U$ -характеристики вздовж осі напруг без змін форми. В МДН - транзисторах відбувається зміна порогової напруги, що відображається на ВАХ. Принцип дії МДН-структур у якості газових сенсорів

базується на зміні реального потенціалу на границі гетеропереходу відносно прикладеної напруги у зв'язку зі зміною роботи виходу з металу затвору під дією адсорбованого газу (рис. 1.9).

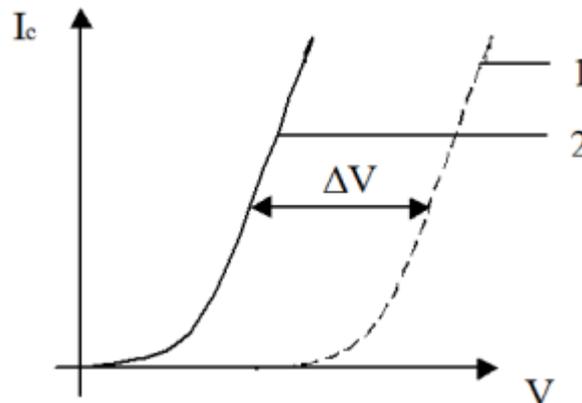


Рисунок 1.9 - Зміна вольт-амперної характеристики МДН-структур: 1 – до подачі газу; 2 – після подачі газу.

Прийнятою теорією щодо зміни роботи виходу матеріалу затвору під дією аналіту є утворення дипольного шару на межі поділу метал – діелектрик. На затворі відбувається явище каталітичної адсорбції молекул газу з їх наступною дисоціацією. Через високий коефіцієнт дифузії атомів аналізованого газу у металі, з якого виготовлений затвор, газові частинки адсорбуються не лише зовнішньою поверхнею металу, а внутрішньою, тобто на межі поділу. Знаходячись на цій межі поділу, атоми поляризуються та, накопичуються під час процесу встановлення рівноваги з газовмісним середовищем, утворюючи подвійний електричний шар, що вважається причиною зміни роботи виходу металу. [3]

Найчастіше використовується структура із паладієвим заслоном. Її повний відгук складається з явища часового дрейфу і, здатної до зворотної зміни, роботи виходу електронів. Потрапивши в перші шари МДН-структури протони не просуваються вглиб діелектрика  $\text{SiO}_2$  через сильне електричне поле. При регенерації в безкисневому середовищі активні центри внутрішньої поверхні паладію швидко звільняються і протони з глибоких шарів діелектрика повільно виходять. Значно підвищити ефективність такого процесу можна

додаванням кисню завдяки його взаємодії з воднем. Таким чином водень видаляється з внутрішньої поверхні паладію і утворюється вода. Значним недоліком такої структури є відшарування паладієвої плівки від поверхні  $\text{SiO}_2$  у процесі роботи, що знижує термін придатності сенсорів. Також загальну селективність газових сенсорів на МДН-структурах можна покращити завдяки нанесенню додатково шару цеоліту на метал.

#### **1.4.6 Газові сенсорні з діодом Шотткі**

Головною перевагою таких сенсорів є велика швидкість відгуку та порівняно невеликі робочі температури (приблизно  $80^\circ\text{C}$ ). Також такі прилади є дуже чутливими через значну залежність струму діода Шотткі від висоти його потенціального бар'єру [2]. Головною причиною, що змінює висоту бар'єру Шотткі в сенсорах на основі іонних напівпровідників, є зміна роботи виходу з металу затвора. Механізм зміни роботи виходу з металевої плівки при дії газу аналогічний тому, що й для МДН-структур. Діод Шотткі встановлюється на підкладку, яка найчастіше виготовлена з матеріалу з високою теплопровідністю для забезпечення ефективного відведення тепла [11]. Контакти підключаються до діода і вимірюють зміну його електричних властивостей. Для покращення взаємодії з певними газами, можна покрити поверхню діода Шотткі різними матеріалами або функціональними шарами відповідно до газу, який аналізується.

#### **1.4.7 Оптичні сенсорні**

В оптичних сенсорах за допомогою вбудованого спектроскопа реєструється зміна величини світлопропускання при подачі газу на чутливий шар такого сенсора. В іншому випадку такі сенсорні фіксують зміну інтенсивності флуоресценції. Оптичні газові сенсорні зазвичай мають високу чутливість і специфічність до певних газів, і їх широко застосовують у галузі медицини, екології, промисловості тощо [1].

Оптоелектронні і оптоволоконні сенсори складаються з джерела світла та фотоприймача і визначають концентрацію газів в середовищі у якому знаходяться. Оптоелектронні реагують на зміну вихідного сигналу, а оптоволоконні на оптичні властивості оптоволоконна вздовж якого поширюється світло.

Оптотермічні сенсори складаються (рис.1.10) з п'єзоелектричного кристалу з наскрізним отвором та сапфірової підкладки. Під час дії світла, що поглинається накладкою, змінюються механічні властивості сапфіру. Зміну цих властивостей реєструє п'єзокристал, що дозволяє визначити концентрацію газу [2].

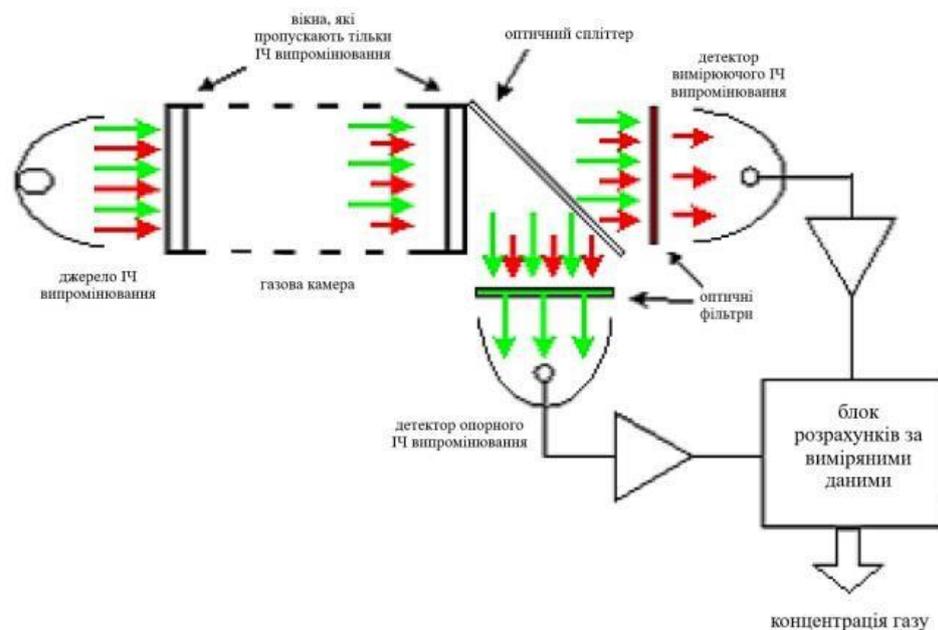


Рисунок 1.10 - Приклад схеми оптичного газового сенсора [8]

#### 1.4.8 Чутливі до зміни маси сенсори

Чутливі до змін маси газові сенсори діляться на так звані кварцові мікроваги та прилади на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Мікроваги покривають тонким шаром адсорбата і коли в досліджуваному середовищі концентрація газу збільшується, зменшується частота вихідного сигналу генератора. Така система дозволяє вимірювати вагу у діапазоні нанограмів [2].

### 1.4.9 Графенові газові сенсори

Розвиток нанотехнологій спричинив значний вплив на конструктивні рішення майже будь-яких приладів. Таким чином для створення газових сенсорів почали використовувати синтезовані з металів нанопроволки, квантові точки на основі сполук кадмію, вуглецеві нанотрубки. Тому не можна не зазначити графен, як підходящий матеріал для створення газових сенсорів. Графен - це двовимірна структура атомів карбону, одна з його алотропних форм. Він являє собою моноатомний шар атомів вуглецю із гексагональною ґраткою і є основним структурним елементом графіту, карбонових нанотрубок та фулеренів.

Ще одним матеріалом, сімейства графенів, є оксид графену. Він є шаруватим матеріалом, здатним містити функціональні групи кисню, епоксиду, гідроксилів, карбоксилів а також спирти, розташовані на краю та поверхні структури із співвідношенням вуглецю до кисню приблизно 3:1 [9]. Важливо зазначити, що наявність функціональних груп кисню на поверхні графену спричиняє підсилення гетерогенної швидкості передачі заряду і електронів [10].

Графен має низку унікальних властивостей: велика поверхнева площа, механічна міцність, що вища за сталь у 200 разів, висока пружність електро- та теплопровідність. Такі характеристики роблять цей матеріал ефективним для виготовлення газових сенсорів на його основі, особливо при розробці низькотемпературних датчиків. Важливо зазначити, що адсорбція є важливою характеристикою при проектуванні та роботі газових сенсорів, а електронні властивості графену мають сильний вплив на неї [11]. Встановлено, що адсорбція молекул газу з навколишньої атмосфери супроводжується легуванням графенових шарів електронами або дірками залежно від природи адсорбованого газу. Таким чином, на основі змін питомого опору є можливість для вимірювання концентрації газів у середовищі. Графен має неймовірну питому площу поверхні 2630 м<sup>2</sup>/г, що робить одним із найкращих матеріалів у відношенні площі до об'єму. Ця властивість може сильно відобразитись на

чутливості сенсорів. Також графен показує високу стабільність та гарну сумісність з іншими мікроелектронними технологіями [12,13].

Графенові сенсори (рис.1.11) ефективні при взаємодії з газами з великими енергіями зв'язку. До таких можна віднести  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . Графенові газові сенсори також мають можливості виявлення різних парів, серед яких ацетон, неанол, октанова кислота, три метиламін, йод, етанол та інші. Важливим зауваженням є те, що для використання у газових сенсорах краще підходить оксид графену, ніж його чиста версія, через різницю у стійкості, хоча це і має певний негативний вплив на провідні характеристики сенсорів [14]

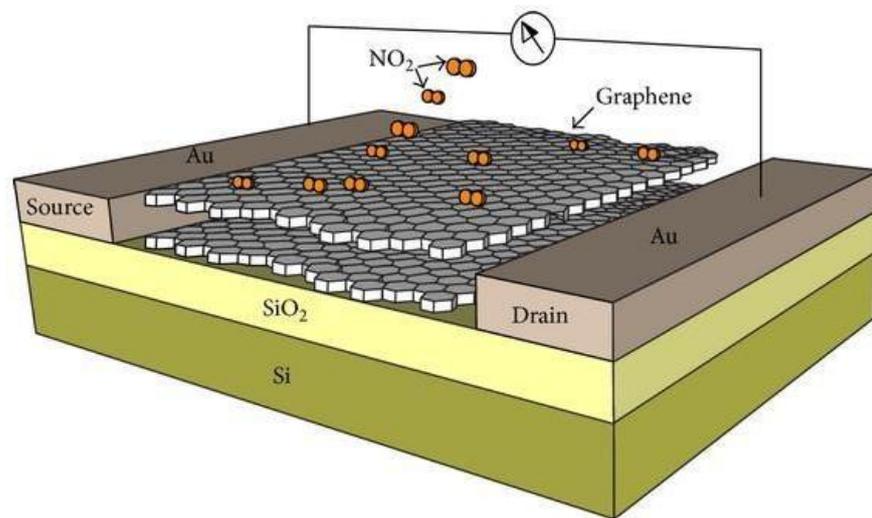


Рисунок 1.11 - Приклад схеми графенового газового сенсора [15]

Найбільш перспективними наразі вважаються напівпровідникові газові сенсори сорбційного типу завдяки низці переваг: малі розміри, економне споживання потужності, проста конструкція, низька вартість виготовлення. Серед недоліків такі аналізатори мають досить низьку стабільність та селективність, а робоча температура чутливого елемента є високою, але при використанні певних конструктивних методів удосконалення сенсору, можна позбавитись від недоліків, чи хоча б зменшити їх вплив.

**Висновки:**

Порівнявши класифікацію всіх датчиків CO<sub>2</sub> можна зрозуміти, що кожен тип датчику підходить під своє середовище, отже під середовище інкубатора добре підходять оптичні сенсори з інфрачервоним випромінюванням. Саме таким є датчик NDIR. NDIR (Недисперсійний інфрачервоний аналіз) – це метод вимірювання концентрації газу, який використовує унікальний діапазон довжин хвиль поглинання вибраних газів для визначення присутності цільового газу. Процес вимірювання полягає в тому, що Інфрачервоне світло (або світлодіод) надсилається з одного кінця випробувальної камери до іншого кінця. Коли кількість CO<sub>2</sub>, що надходить у камеру, збільшується, кількість інфрачервоного світла, що проходить через камеру, зменшується. Датчик вимірює це зниження інтенсивності. Чим вища інтенсивність CO<sub>2</sub>, тим вищий вміст CO<sub>2</sub> у навколишньому середовищі. Газ дифундує в оптичну порожнину. Світло від джерела інфрачервоного випромінювання проходить через оптичну порожнину, де воно взаємодіє з газом, а потім потрапляє на детектор. Деякі гази поглинають інфрачервоне випромінювання на певних довжинах хвиль (смуги поглинання). Двоканальний детектор складається з активного каналу та опорного каналу. Активний канал оснащений світлофільтром, який пропускає лише світло з довжиною хвилі, що відповідає смузі поглинання цільового газу. Якщо цільовий газ присутній в оптичному резонаторі, інтенсивність світла, що проходить через фільтр і потрапляє на активний канал, зменшується. Еталонний канал детектора оснащений фільтром, який пропускає лише довжини хвилі світла, через які немає смуг поглинання. Наявність газу не впливає на інтенсивність світла, що потрапляє на контрольний канал. Використання опорного каналу дозволяє компенсувати коливання інтенсивності світла.

Сучасні пристрої NDIR із подвійною довжиною хвилі зазвичай мають один детектор із еталонним і газовим оптичними фільтрами. Один

використовується як еталон, щоб забезпечити стабільність і еталон, тоді як газовий фільтр забезпечує фактичне вимірювання.

Датчики NDIR не мають фактичного контакту з газом. Це робить ці монітори набагато надійнішими, оскільки їх можна адаптувати до конкретних газів без потенційного впливу інших газів.

У той час як у багатьох газових моніторах і системах детекторів використовується електрохімічна технологія, монітори NDIR фактично не взаємодіють із цільовими газами – електрохімічні блоки можуть взаємодіяти з кількома газами, знижуючи їхню ефективність.

Тобто з цього всього ми можемо зрозуміти, що технологія NDIR є найкращою на даний момент.

## **2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ**

Сенсори вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), як первинні вимірювальні перетворювачі неелектричної величини в електричну, є основним елементом сучасних комп'ютеризованих систем вимірювань і контролю якості повітря [16] в промисловості, сільському господарстві, охороні навколишнього середовища, аерокосмічній, медичній та інших галузях.

В теперішній час відомо багато типів [17-20] вимірювальних перетворювачів вуглекислого газу, основними з яких є сенсори теплопровідності, денситометра, поглинання випромінювання, електричної провідності, хімічного поглинання, електрохімічні, хроматографічні, інфрачервоної оптики тощо. Від їхніх метрологічних характеристик в переважній більшості залежить точність вимірювань і вірогідність контролю систем автоматизованого контролю.

Тому, надзвичайно актуальною вже на стадії розробки є задача математичного моделювання для попереднього оцінювання таких статичних метрологічних характеристик, як функція перетворення і чутливість.

Метою даного розділу є вдосконалені експоненційна і лінеаризована математичні моделі, які являють собою функції перетворення інфрачервоного сенсора концентрації вуглекислого газу та аналітичні залежності для оцінювання чутливості.

### **2.1 Розробка та аналіз теоретичної математичної моделі інфрачервоного сенсора концентрації вуглекислого газу**

Недисперсійні інфрачервоні сенсори являють собою прості спектроскопічні пристрої, які частіше всього використовують для аналізу концентрації газів. Основними складовими (рис. 2.1) таких сенсорів є:

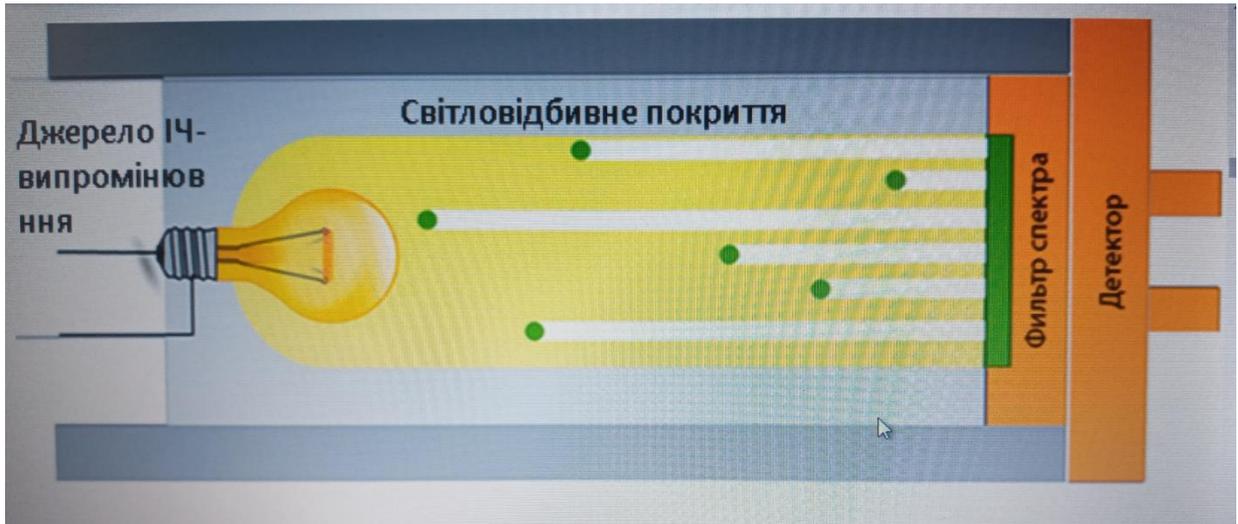


Рисунок 2.1 – Принцип дії інфрачервоного сенсора [22-23]

Інфрачервоне джерело [24]; вимірювальна камера або світлова трубка; фільтр довжини хвилі; інфрачервоний детектор.

В наведеній структурі досліджуваний газ накачується або потрапляє природним чином у вимірювальну камеру, потім концентрація газу вимірюється електрооптичним шляхом, завдяки поглинанню певної довжини хвилі в інфрачервоному спектрі (ІЧ).

ІЧ-промінь прямує через вимірювальну камеру до детектора. Перед детектором встановлений оптичний фільтр [25], який поглинає все світло, крім певної довжини хвилі, яка може бути поглинена молекулами вимірюваного газу. Молекули інших газів не поглинають світло (рис. 2.2) на обраній довжині хвилі, тому вони не можуть суттєво вплинути на вихідну напругу сенсора.

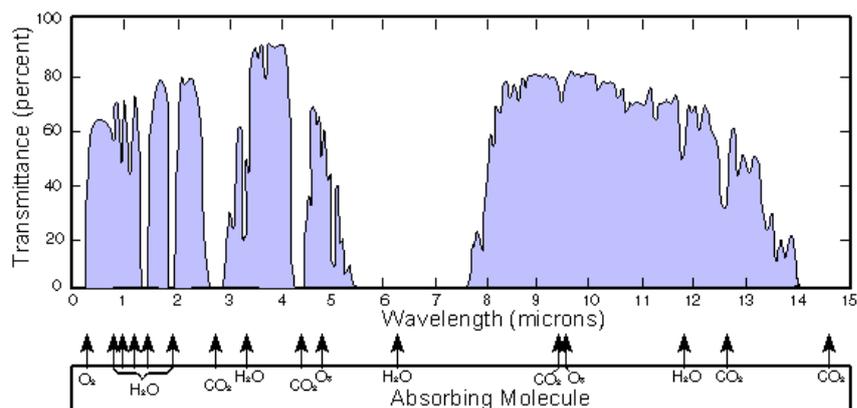


Рисунок 2.2 – Спектри поглинання газів [21]

Вимірювальна камера забезпечує вільне відбивання від стінок інфрачервоного променя на його шляху до детектора [26-27]. Якість покриття вимірювальної камери безпосередньо впливає на точність та довговічність приладу.

Інтенсивність інфрачервоного випромінювання, з якої промінь досягає детектора, обернено пропорційна концентрації газу в вимірювальній камері. Коли концентрація в камері дорівнює нулю, детектор буде отримувати максимальну інтенсивність інфрачервоного променя. При збільшенні концентрації інтенсивність інфрачервоного випромінювання, що попадає на детектор, зменшується.

### 2.1.1 Розробка нелінійної математичної моделі сенсора

Інфрачервоні сенсори потенційно можуть використовуватись для вимірювання концентрації практично усіх неорганічних та органічних газів, але найчастіше їх застосовують для вимірювання концентрації вуглекислого газу, оскільки жодний інший метод вимірювання не забезпечує високу надійність, простоту реалізації та необхідні чутливість і точність.

Для отримання функції перетворення, яка однозначно пов'язує вихідну напругу  $U$  сенсора з вхідною неелектричною величиною вимірюваною концентрацією  $P$  вуглекислого газу  $CO_2$ , проаналізуємо послідовність вимірювальних перетворень сенсора. Основні фази перетворення неелектричної величини  $P$  в електричну  $U$  для інфрачервоного сенсора наведено на рис.2.3.

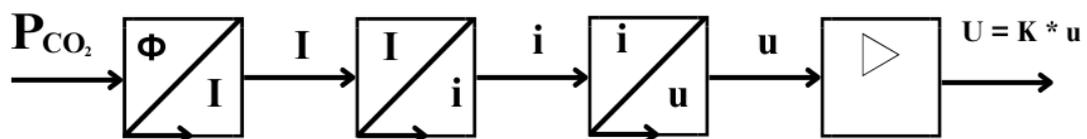


Рисунок 2.3 – Послідовність вимірювальних перетворень концентрації

Аналітично інтенсивність  $\Phi$  інфрачервоного випромінювання від вимірюваної концентрації подається законом Бугера-Ламберта-Бера [6]:

$$\Phi = I_0 \cdot e^{k \cdot P}, \quad (1)$$

де:  $\Phi$  – інтенсивність світла, що потрапляє на детектор;

$I_0$  – інтенсивність світла, виміряна при порожній камері;

$k$  – показник поглинання вимірюваного газу;

$P$  – концентрація вимірюваного газу.

Інтенсивність  $\Phi$  інфрачервоного випромінювання, що попадає після фільтра на фотодетектор, перетворюється у відповідне значення його (рис. 2.4) вихідного струму [26-27]:

$$i = S \cdot \Phi = S \cdot I_0 \cdot e^{k \cdot P} \quad (2)$$

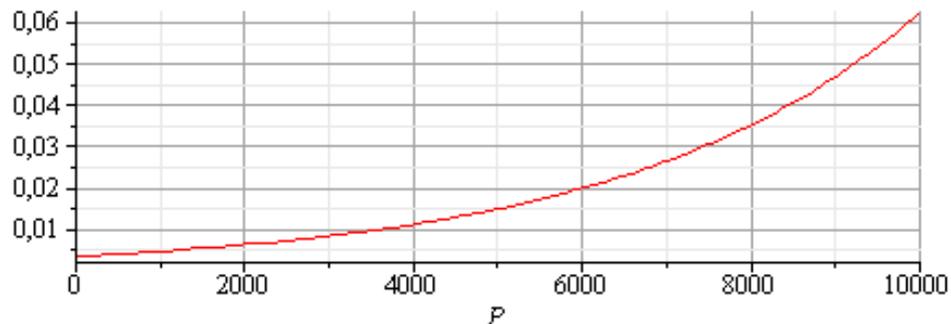


Рисунок 2.4 – Залежність вихідного струму сенсора від концентрації  $\text{CO}_2$

А далі на резисторі  $R$  у напругу

$$u = i \cdot R = R \cdot S \cdot I_0 \cdot e^{k \cdot P}. \quad (3)$$

Графічна залежність вихідної напруги  $U$  інфрачервоного детектора від концентрації  $P$  вуглекислого газу наведена на рис. 2.5.

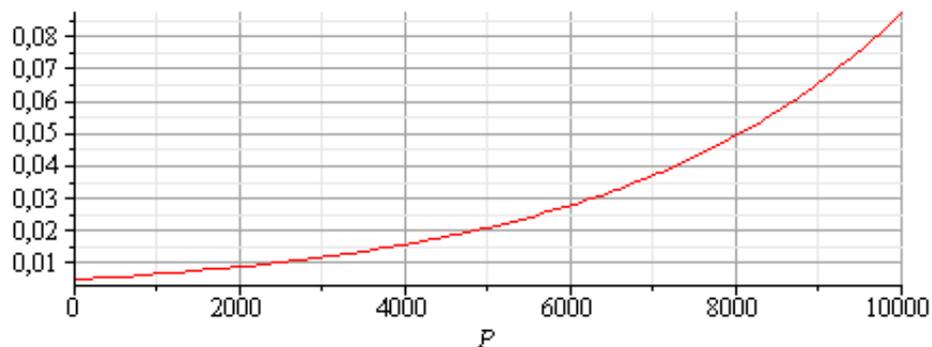


Рисунок 2.5 – Залежність вихідної напруги  $u$  від концентрації  $P$

Для забезпечення надійної роботи аналог-цифрового перетворювача в повному діапазоні зміни напруги  $U$  на його вході значення вихідної напруги  $u$  з виходу детектора необхідно масштабувати – підсилити в  $K$  раз

$$U = K \cdot u = K \cdot R \cdot S \cdot I_0 \cdot e^{k \cdot P}. \quad (4)$$

Остаточна статична характеристика, що являє собою графічне подання функції перетворення (4), наведена на (рис. 2.6).

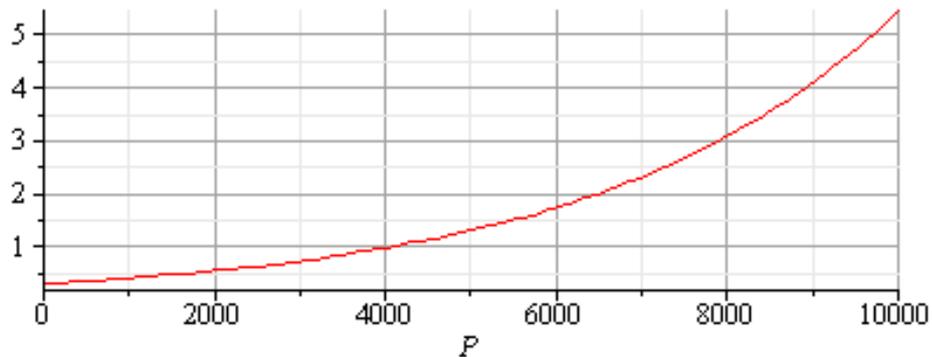


Рисунок 2.6 – Статична характеристика сенсора

Якщо з рівняння перетворення (19) взяти похідну від вихідної величини  $U$  по вхідній  $P$ , то отримаємо рівняння чутливості інфрачервоного сенсора

$$S = \frac{d}{dP} U = -K \cdot R \cdot S \cdot I_0 \cdot k \cdot e^{k \cdot P}. \quad (5)$$

Аналіз (5) показує, що чутливість даного сенсора є не сталою величиною, а змінюється протягом всього діапазону зміни вимірюваної концентрації  $P$  (рис.2.6).

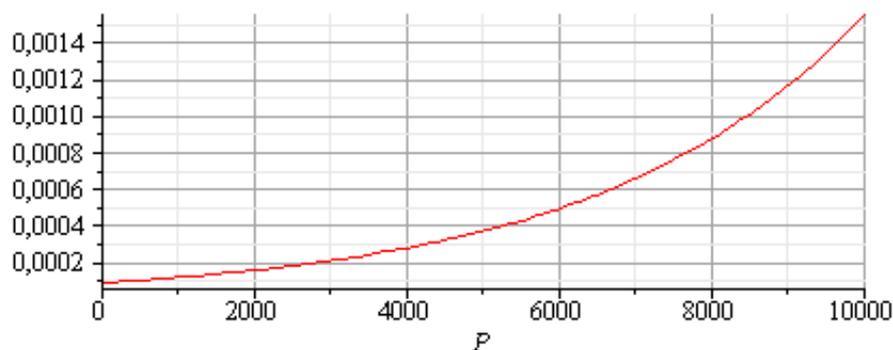


Рисунок 2.7 – Зміна чутливості сенсора CO<sub>2</sub>

Змінність чутливості в області можливої зміни вимірюваної концентрації притаманна усім нелінійним моделям. Ця властивість чутливості викликає такі

недоліки сенсора: нерівномірність шкали, що є причиною змінної ціни  $S$  поділки (кроку квантування  $h$ ). Ця обставина є основною причиною певних складностей під час градування шкали. В мікропроцесорних засобах вимірюваннях цей недолік не є суттєвим. Але для зменшення похибки дискретизації необхідно застосовувати адаптивні алгоритми, за допомогою яких здійснюють нормування цієї складової похибки – постійно адаптують значення кроку дискретизації до швидкості зміни вхідного сигналу.

### 2.1.2 Розробка лінійної математичної моделі сенсора

В лінійних моделях виділені недоліки відсутні. Якщо в процесі проектування інфрачервоного сенсора розрахувати числові значення чутливості  $S$  детектора і показника  $k$  поглинання, які притаманні тільки вуглекислому газу, то з'являється можливість реалізації вимірювального перетворювача концентрації  $CO_2$  з лінійною статичною характеристикою.

Для монохроматичного світла закон Бугера-Ламберта-Бера Біра-Ламбера відтворює нелінійну залежність в широкому діапазоні зміни вимірюваної концентрації  $P$  вуглекислого газу від напруги на виході детектора (рис.5).

У вузькому [28-29] діапазоні зміни концентрації  $P$  (від 0 до 5000 ppm), що характерно для зміни концентрації  $CO_2$  в інкубаційних камерах, то добуток  $k \cdot P$  лінеаризує залежність вихідного струму детектора від вимірюваної величини (рис. 2.7), яку аналітично подають так наближається до лінійного співвідношення

$$i = - S \cdot F (1 - k P). \quad (6)$$

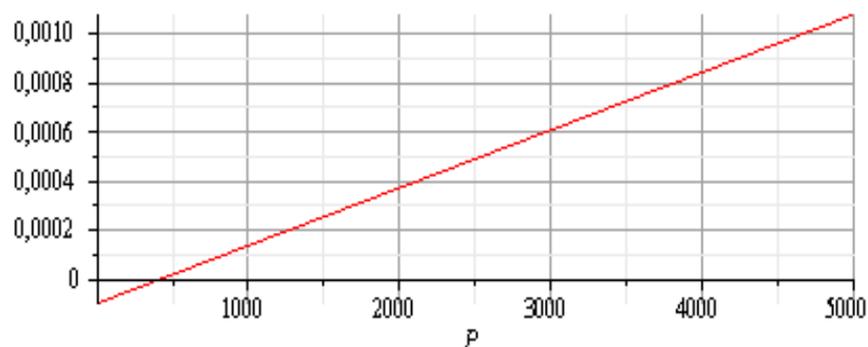


Рисунок 2.8 – Залежність струму детектора від концентрації  $CO_2$

Перетворивши шунтом з опором  $R$  значення струму  $i$  в напругу  $u$  отримаємо (рис.2.8)

$$u = i \cdot R = -S \cdot F \cdot R (1 - k P). \quad (6)$$

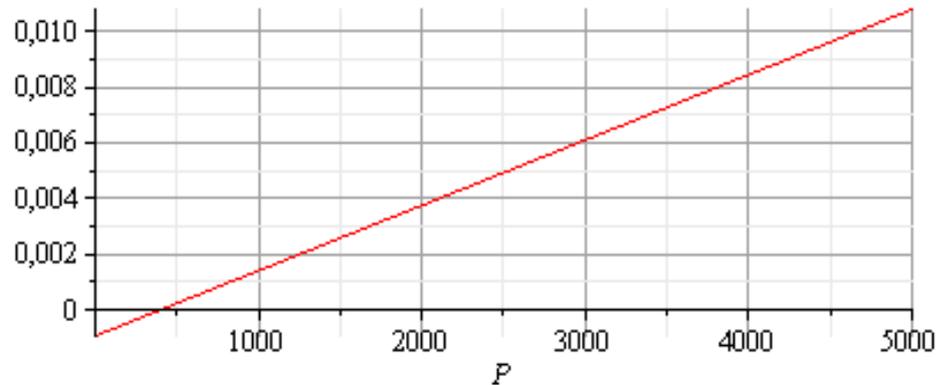


Рисунок 2.9 – Залежність вихідної напруги детектора від концентрації  $\text{CO}_2$

Після масштабування значення цієї напруги вимірювальним підсилювачем з коефіцієнтом підсилення  $K$ , матимемо

$$U = K \cdot u = -K \cdot S \cdot F \cdot R (1 - k P). \quad (6)$$

Графічне подання остаточної функції перетворення (лінійної статичної характеристики) наведено на рис. 2.9.

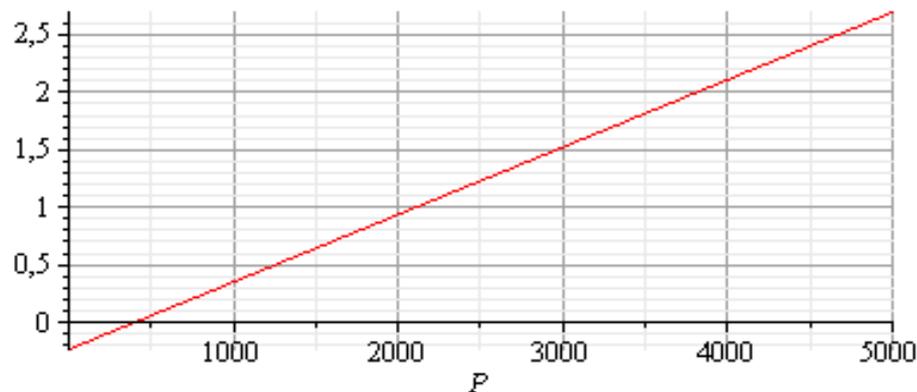


Рисунок 2.10 – Лінійна статична характеристика сенсора концентрації  $\text{CO}_2$

## Висновки

1. Запропоновано нелінійну математичну модель інфрачервоного вимірювального перетворювача у вигляді експоненційної функції перетворення, що однозначно пов'язує між собою вихідну напругу з вимірюваною концентрацією вуглекислого газу. В результаті її математичного

моделювання показано, що чутливість такого типу вимірювальних перетворювачів в діапазоні зміни вимірюваною величини є величиною змінюваною та є причиною їхніх недоліків: нерівномірність; не постійний крок дискретизації

2. Для усунення цих недоліків запропоновано один із можливих шляхів лінеаризації функції перетворення для конкретного типу газу – вуглекислого. Переваги такого підходу підтверджені результатами комп'ютерного моделювання нелінійної і лінеаризованої функцій перетворення.

## **2.2 Розробка та аналіз емпіричної математичної моделі інфрачервоного сенсора концентрації вуглекислого газу**

Метод недисперсійного інфрачервоного випромінювання NDIR надзвичайно розповсюджений піл час вимірювання концентрації вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ . Інфрачервоне випромінювання в газовій камері сенсора (рис.2.1) попадає на молекули газу  $\text{CO}_2$ , які поглинають певну кількість світла на довжині хвилі 4,26 мкм. Інтенсивність інфрачервоного випромінювання, з якою промінь досягає детектора, обернено пропорційна концентрації газу  $P$  (16) в вимірювальній камері. Ця обставина і пояснює нелінійний характер функції перетворення сенсорів цього типу. Лінеаризована статична характеристика (рис.2.10) значно спрощує аналітичні залежності основних статичних метрологічних характеристик сенсора, але в обмеженому діапазоні зміни концентрації. Крім того має місце ще і похибка моделі. Для усунення цих недоліків розглянемо методику отримання експериментальної (емпіричної) статичної характеристики.

Експериментальні дослідження для отримання емпіричної статичної характеристики проведемо на прикладі сенсора концентрації вуглекислого газу NDIR EE872 за схемою, що наведена на рис.2.11.

На рис.2.11 використано такі умовні позначення: сенсор NDIR EE872 концентрації вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  (на рис.10  $P_{\text{CO}_2}=1229$  ppm); цифровий

вольтметр (на рис.10  $U=0.638$  В). Сенсор заживлена напругою постійного струму +12 В, а його впливними величина є температура  $T^{\circ}\text{C}$  і вологість  $\text{H}_2\text{O}\%$ .

Вхідною величиною сенсора (табл.2.1) є вимірювана концентрація вуглекислого газу, що змінюється в діапазоні від 200 до 10000 ppm.

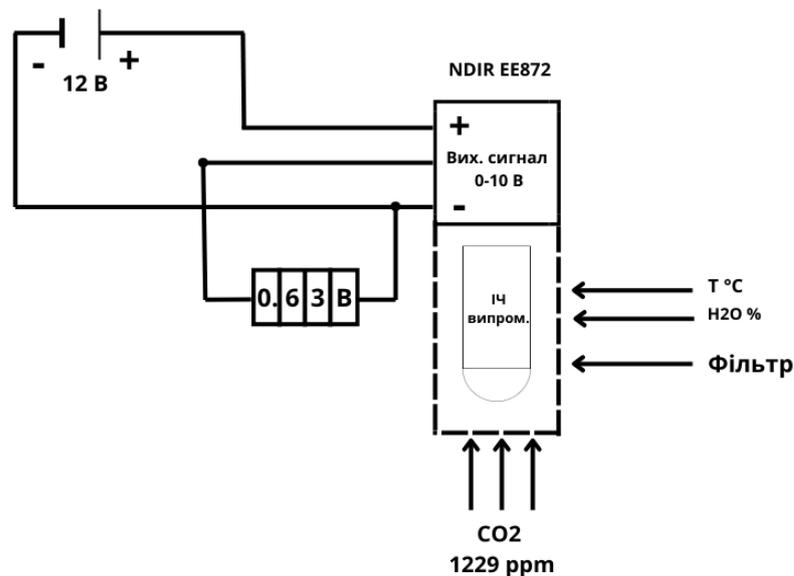


Рисунок 2.11 – Схема експериментальних досліджень сенсора NDIR EE872

Таблиця 2.1 – Метрологічні характеристики сенсора NDIR

Вимірювана величина	Діапазон вимірювання	Роздільна здатність	Похибка вимірювання	Швидкодія
Концентрація $\text{CO}_2$	0...10 000 ppm	1 ppm	Абсолютна $\pm 50$ ppm Відносна $\pm 5.0\%$	$\leq 15$ с

Вихідною величиною сенсора є напруга на його виході, значення якої отримують за допомогою цифрового мультиметра (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Метрологічні характеристики мультиметра OWON B41T+

Вимірювана величина	Діапазон вимірювання	Роздільна здатність	Відносна похибка
Постійна напруга	0...220 мВ	0.01 мВ	$\pm(0.1\%+5\text{dig})$
	0...5.0 В	0.10 мВ	$\pm(0.1\%+2\text{dig})$

Результати вимірювань  $P$  концентрації  $\text{CO}_2$  і вихідної напруги  $U$  сенсора наведено в (табл.2.3). Табличне подання функції перетворення  $U=f(P)$  називають ще градууювальною характеристикою.

Таблиця 2.3 – Градууювальна характеристика сенсора NDIR

№п.п.	U, В	P, ppm	№п.п.	U, В	P, ppm	№п.п.	U, В	P, ppm
1	0	204	5	1.71	3400	9	3.36	6600
2	0.49	1000	6	2.13	4200	10	3.76	7400
3	0.91	1800	7	2.53	5000	11	4.15	8200
4	1.31	2600	8	2.96	5800	12	4.59	9000

Графічне подання функції перетворення називають статичною характеристикою, вид якої наведено на (рис.2.12). На цій графічній залежності по вісі  $y$  відкладено значення вихідної напруги сенсора у вольтах, а по вісі  $x$  – значення вимірюваної концентрації у ppm.

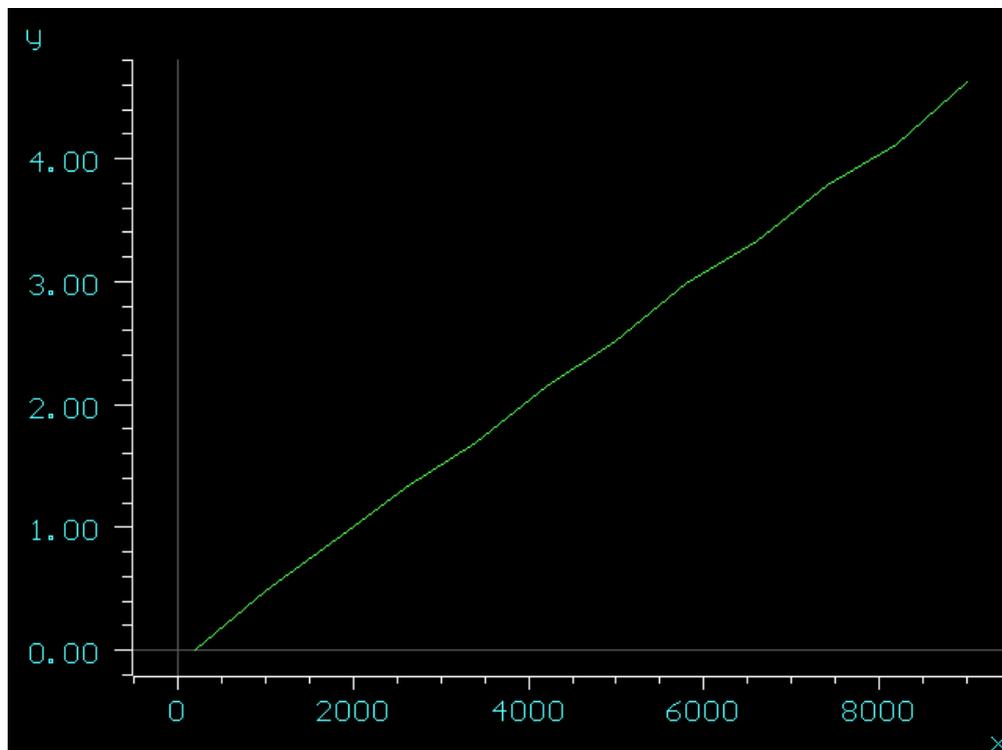


Рисунок 2.12 – Експериментальна статична характеристика сенсора NDIR

Для отримання емпіричної функції перетворення необхідно апроксимувати отримані результати вимірювань поліномом необхідного порядку. Порядок та вид полінома встановимо на підставі аналізу результатів, що отримано в п.2.1 цього розділу та експериментальної статичної характеристики:

- Отримана експериментальна статична характеристика в діапазоні зміни вимірювані концентрації (0...9000 ppm) є лінійною;
- Крім того, нульовому значенню напруги відповідає не нульове, а відмінне від нуля додатне значення концентрації на вході сенсора;
- Наявність адитивної похибки пояснює рівняння (16), що аналітично описує закон Бугера-Ламберта-Бера  $\Phi = I_0 \cdot e^{-k \cdot P}$ . При нульовому значенні концентрації ( $P=0$ ) вуглекислого газу, значення інтенсивність світла що потрапляє на детектор не дорівнює нулю  $\Phi \neq 0$ , а дорівнює  $I_0$  – інтенсивності світла, виміряній при порожній камері.

Виходячи з цього, в якості апроксимуючої залежності [15] обираємо поліном першого порядку такого виду

$$U = -a + b \cdot P, \quad (7)$$

де  $a$  – адитивна похибка (похибка нуля);

$b$  – мультиплікативна похибка (похибка чутливості);

$U$  – вихідна величина сенсора;

$P$  – вхідна величина (вимірювана концентрація).

Апроксимацію [30-31] здійснимо в середовищі програмного забезпечення NUMERI, що адаптовано до Windows драйвером DOSBox 0.74-3. В результаті отримаємо такі числові значення коефіцієнтів для рівняння перетворення (7):

$$a = - 0.05 [V]; \quad b = + 0.0005 [1/ppm]. \quad (8)$$

З врахуванням (8), емпірична функція перетворення приймає такий остаточний вигляд

$$U = -0.05 + 0.0005 \cdot P. \quad (9)$$

Графічне подання (рис.2.13) рівняння перетворення (9) будемо називати апроксимованою статичною характеристикою.

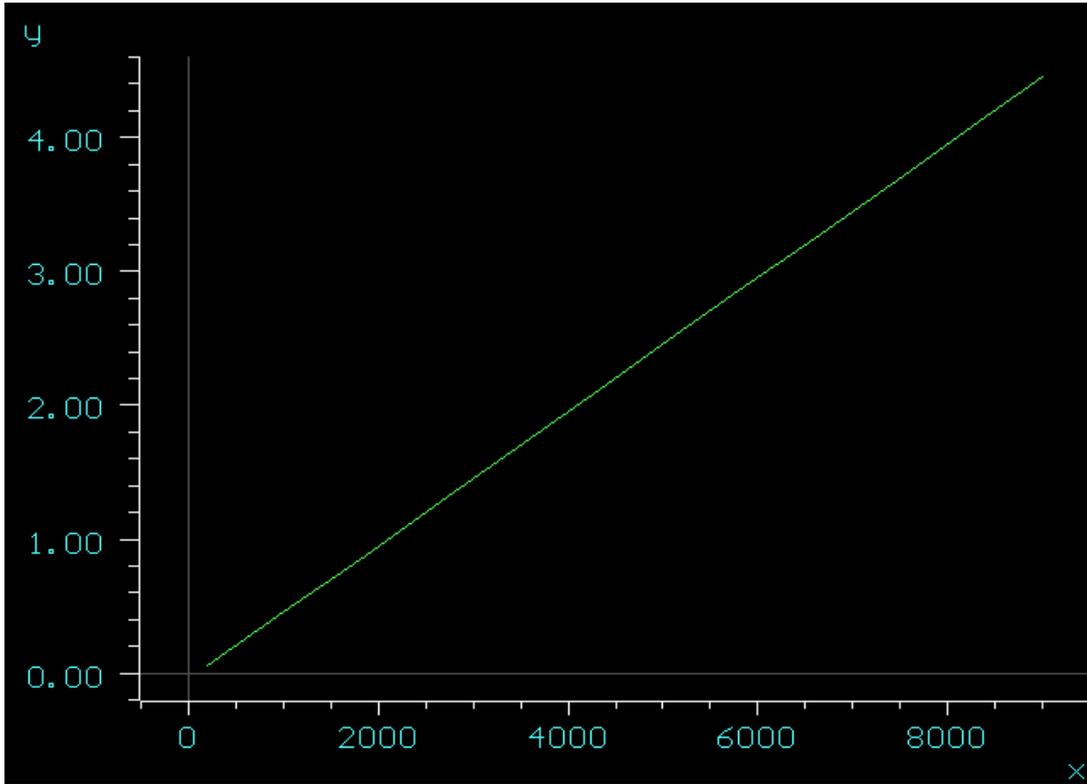


Рисунок 2.13 – Апроксимована статична характеристика сенсора NDIR

Одночасне подамо (рис.2.14) дві статичні характеристики (експериментальну і апроксимовану) на одному графіку.

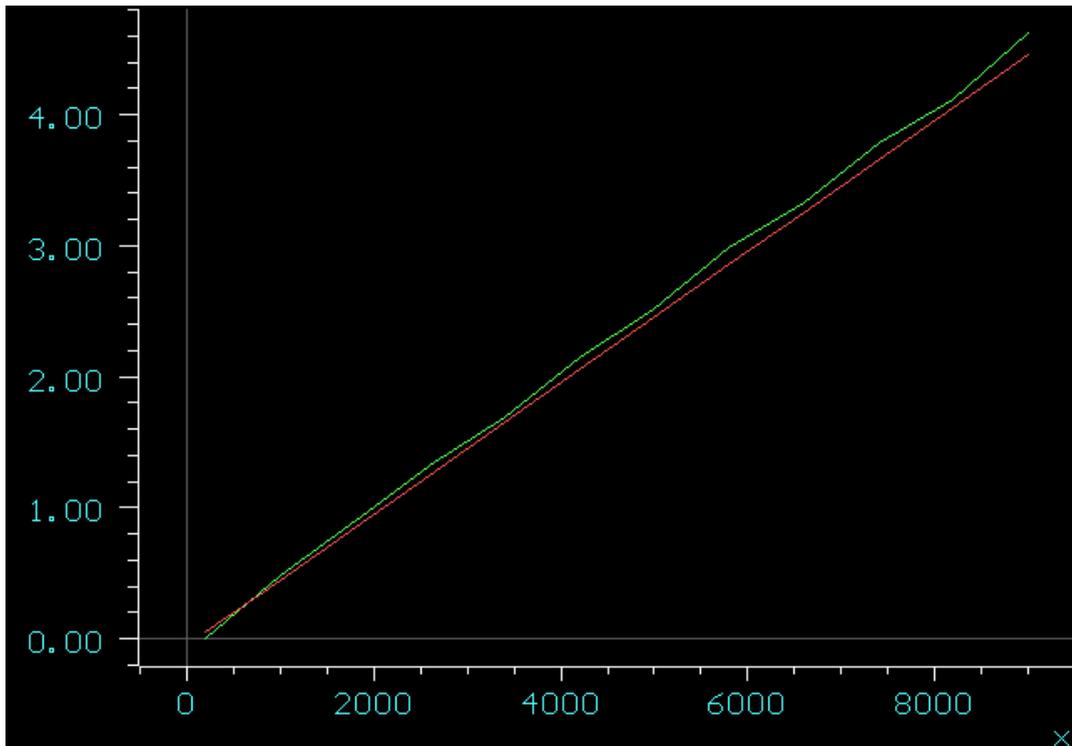


Рисунок 2.14 – Експериментальна і апроксимована статичні характеристики

Оцінимо абсолютну похибку апроксимації (рис.2.15), як різницю між вимірним і дійсним значенням.

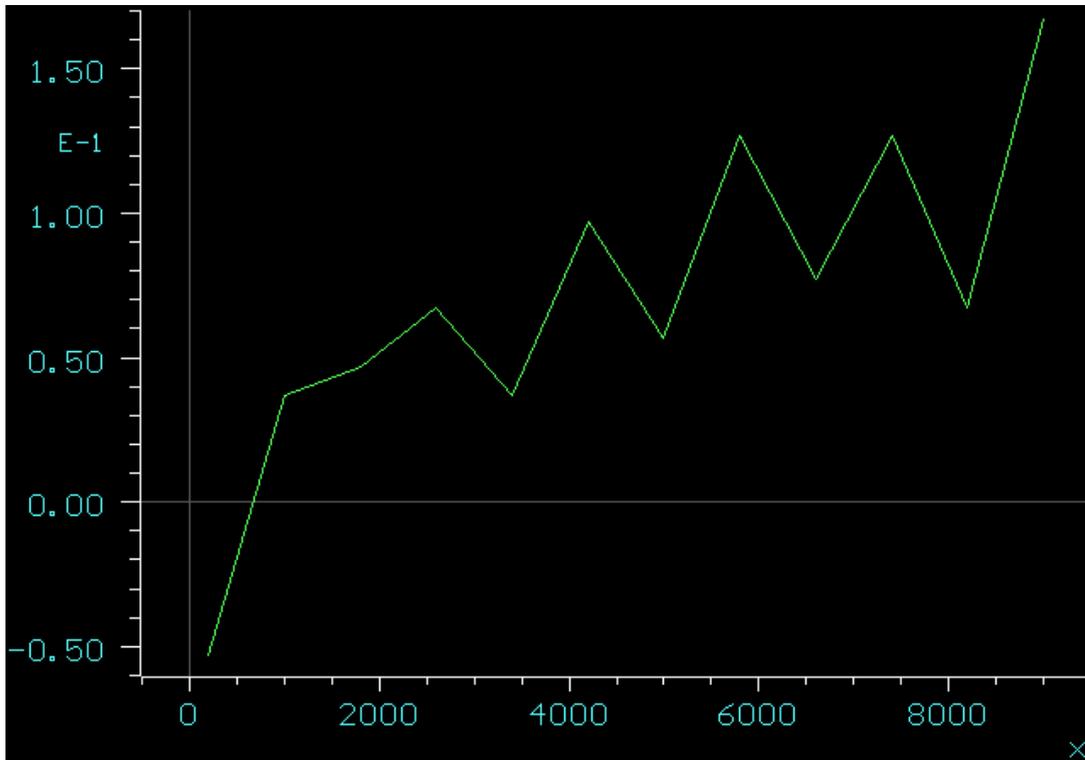


Рисунок 2.15 – Абсолютна похибка моделі

Аналіз отриманих результатів (рис.2.15) показує, що абсолютна похибка моделі (похибка апроксимації) не перевищує роздільної здатності сенсора NDIR (табл.2.1).

### 2.2.1 Оцінювання основних статичних метрологічних характеристик

Аналіз рівняння перетворення (9) свідчить про наявність адитивної похибки в процесі вимірювального перетворення концентрації вуглекислого газу у вихідну напругу сенсора NDIR. Значення цієї складової похибки (рис.2.16) для даного типу сенсора дорівнює  $-0.05$  В. Тому статична характеристика починається не нуля.

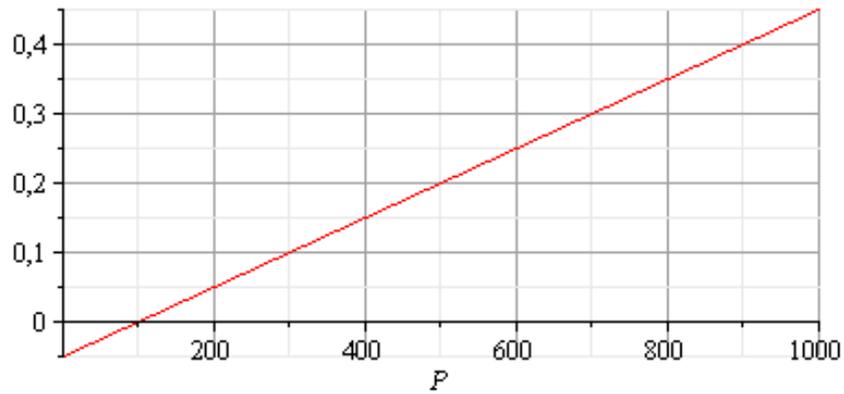


Рисунок 2.16 – Статична характеристика сенсора з адитивною похибкою

Якщо в результати вимірювання ввести поправку +0.05 В

$$U = -0.05 + (+0.05) + 0.0005 \cdot P, \quad (10)$$

то отримаємо скореговану статичну характеристику (рис.2.17).

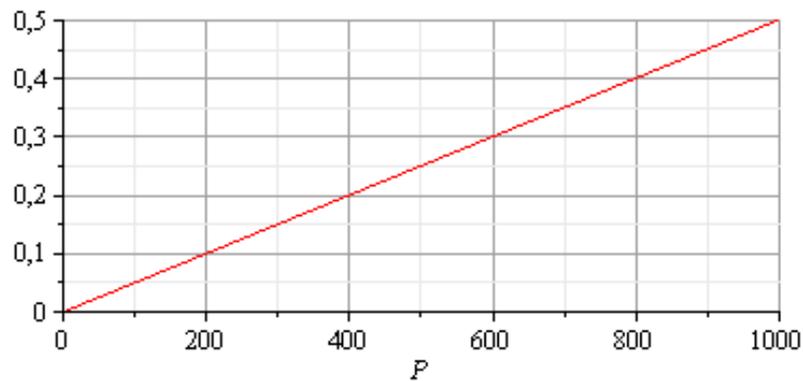


Рисунок 2.17 – Статична характеристика після коригування

Одночасне подання двох характеристик на одному графіку (рис.2.18) дозволяє зробити висновок, що за рахунок впливу адитивного коефіцієнту виникає похибка під час процесу вимірювального перетворення концентрації  $\text{CO}_2$  у вихідну напругу сенсора.

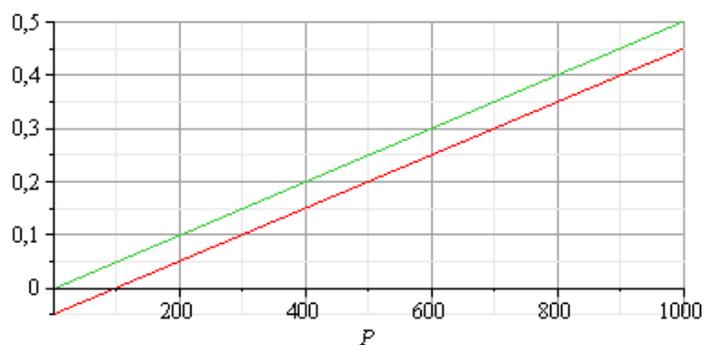


Рисунок 2.18 – Апроксимована (червона) і скорегована (зелена) статичні характеристики сенсора

Оцінимо відносну похибку від впливу адитивної складової

$$\delta_a = \frac{U_a - U_k}{U_k} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де  $U_a$  – значення апроксимованої характеристики;

$U_k$  – значення скорегованої характеристики.

Аналіз відносної похибки (рис.2.19) показує, що її значення можуть досягати на початку діапазону вимірювання суттєвих значень (25%). Тому, використовуючи метод поправок, адитивну похибку необхідно вилучати з результатів вимірювань.

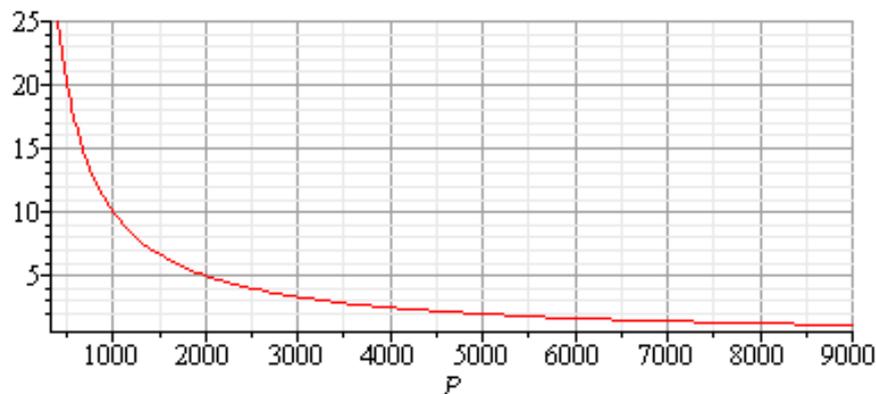


Рисунок 2.19 – Графік зміна відносної похибки

Поряд з рівнянням перетворення (9) до основних статичних характеристик [31-32] інфрачервоного сенсора відносять такі:

- Рівняння чутливості;
- Швидкість зміни чутливості;
- Прискорення зміни чутливості;
- Номінальна функція перетворення;
- Похибка не лінійності.

Чутливість – здатність засобу вимірювання (сенсора) реагувати на зміну вхідного сигналу і визначається, як відношення

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta P} = \frac{U_2 - U_1}{P_2 - P_1},$$

де  $\Delta U$  – зміна вихідного сигналу;

$\Delta P$  – зміна вхідного сигналу.

Визначимо чутливість двома методами:

- по рівнянню перетворення;
- по статичній характеристиці.

Для того щоб отримати рівняння чутливості сенсора, необхідно взяти похідну від вихідної величини  $U$  по вхідній величині  $P$

$$S = \frac{d}{dP} U = \frac{d}{dP} (-a + b \cdot P) = b = 0.0005 \left[ \frac{V}{ppm} \right]. \quad (12)$$

Методика отримання чутливості по статичній характеристиці наступна [17]. Врахувавши те, що статична характеристика сенсора лінійна (рис.2.16) для визначення числового значення чутливості задамося на цій прямій будь-якою точкою із діапазону зміни вхідного сигналу (концентрації вуглекислого газу  $P$ ). Оберемо, наприклад, точку  $P_1 = 4491$  ppm. Цій точці на статичній характеристиці буде відповідати значення вихідної наруги  $U_1 = 2.24$  В. Координати наступної точки, наприклад, такі:  $P_2 = 5081$  ppm;  $U_2 = 2.53$  В.

Тоді значення чутливості, що визначено по статичній характеристиці, дорівнюватиме

$$S = \frac{U_2 - U_1}{P_2 - P_1} = \frac{2.53 - 2.24}{5081 - 4491} = 0.00049 \left[ \frac{V}{ppm} \right]$$

Практичне співпадання отриманих числових значень чутливості різними методами, підтверджує їхню достовірність.

Оскільки статична характеристика лінійна, то чутливість є сталою величиною, тому швидкість зміни чутливості дорівнює

$$V_S = \frac{1}{2} \left( \frac{d}{dP} S \right) = \frac{d}{dP} b = 0. \quad (13)$$

З тієї причини і прискорення зміни чутливості відсутнє

$$\varepsilon_S = \frac{1}{2} \left( \frac{d}{dP} V_S \right) = 0. \quad (14)$$

Оскільки швидкість зміни  $V_S = 0$  і прискорення зміни  $\varepsilon_S = 0$  чутливості нульові, то номінальна функція перетворення приймає вид рівняння перетворення

$$U = S \cdot P + V_S \cdot P^2 + \varepsilon_S \cdot P^3 = b \cdot P = 0.0005 \cdot P \quad (15)$$

Врахувавши (15), отримаємо рівняння для оцінювання похибки нелінійності

$$\Delta_H = V_S \cdot P^2 + \varepsilon_S \cdot P^3 = 0. \quad (16)$$

### **Висновки:**

1. Запропоновано методику отримання експериментальної статичної характеристики сенсора концентрації CO<sub>2</sub> типу NDIR, яка складається з експериментального отримання функції перетворення, апроксимації вимірних значень поліномом першого порядку. Встановлено, що експериментальна статична характеристика цього сенсора лінійна, а її похибка апроксимації прийнятна для використання при подальших дослідженнях сенсора.

2. Показано, що в рівнянні перетворення має місце як адитивна, так і мультиплікативна складові похибки. З метою зменшення впливу адитивної похибки на результати вимірювань запропоновано математична модель для її коригування, що дозволило зменшити відносну похибку на початку діапазону вимірювання з 25% практично до нуля. Отримано також рівняння чутливості, швидкості її зміни, номінальну функцію перетворення та аналітичну залежність для оцінювання похибки не лінійності, які і є основними статичними метрологічними характеристиками сенсора концентрації вуглекислого газу.

### **2.3 Розробка структурної схеми та аналіз математичних моделей вимірювального каналу концентрації вуглекислого газу**

Характерною особливістю вимірювального каналу є [30-31] наявність вимірювального перетворювача (рис.2.20) неелектричної величини (концентрації CO<sub>2</sub>) в електричну величину напругу (U) детектором та цифрового вимірювального каналу напруги з наступним запам'ятовуванням у двійкового коду та подальшого опрацювання апаратно-програмними засобами мікропроцесорної системи.

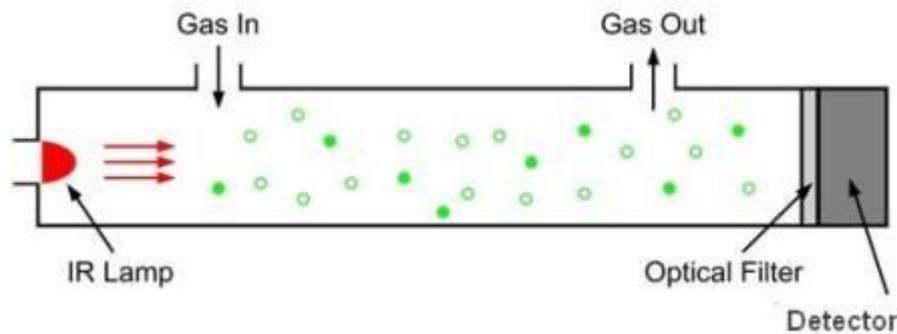


Рисунок 2.20 – До перетворення неелектричної величини в електричну

При вимірюванні неелектричних величин широко застосовуються електричні методи вимірювання [31-33], тобто виконується «електрифікація» таких вимірювань – перетворення неелектричної величини на електричну.

Отже, у загальному випадку засоби вимірювання неелектричних величин конструктивно найчастіше складаються з двох самостійних вузлів:

- сенсора (вимірювального перетворювача) неелектричної величини в електричну;
- цифрового перетворювача електричної величини в двійковий код.

Вони можуть розміщуватися на значній відстані один від одного і з'єднуватись лініями зв'язку або в одному конструктивному виконанні.

### 2.3.1 Функція перетворення сенсора концентрації CO<sub>2</sub>

В попередніх підрозділах (п.2.1 і 2.2) розглянуто принципи дії, функції перетворення і основні статичні метрологічні характеристики інфрачервоного сенсора концентрації вуглекислого газу.

Розроблено і проаналізовано наступні математичні моделі сенсорів такого типу:

- нелінійна (експоненційна) математична модель;
- лінеаризована функція перетворення сенсора;
- емпірична математична модель.

Порівняльний аналіз отриманих математичних залежностей показує, що емпірична функція перетворення є найбільш адекватною експерименту, оскільки її похибка є мінімальною. Тому для подальших досліджень в якості

математичної моделі сенсора обираємо емпіричну скореговану на значення адитивної похибки наступну функцію перетворення

$$U = b \cdot P, \quad (2.13)$$

де  $b$  – мультиплікативна складова, або похибка чутливості,

$P$  – вимірювана концентрація  $\text{CO}_2$  (вхідна величина);

$U$  – напруга на виході сенсора (вихідна величина).

### **2.3.2 Структурна схема і принцип дії і функція перетворення вимірювального каналу напруги**

Вимірювальне перетворення напруги у двійковий код можливо реалізувати різними методами. Наприклад, такими:

1. Методом час-імпульсного перетворення [34-35] напруги у часовий інтервал  $t_0$  з наступним його квантуванням періодами  $T_0$  зразкової частоти  $f_0$ ;
2. Інтегрувальними методами перетворення [36-37] напруги у двійковий код;
3. Методом послідовного наближення [38] компенсувальної напруги  $U_k$  до вимірюваної  $U_x$ ;
4. Методом слідкувального зрівноваження [34,38] шляхом постійного слідкування компенсувальної напруги  $U_k$  за змінами вимірюваної  $U_x$ .
5. методом порозрядного зрівноваження [37-38] вимірюваної напруги  $U_x$  компенсувальною  $U_k$ , що змінюється порозрядно нерівномірними квантами (так званий алгоритм «старшими розрядами вперед»).

Перші два методи для реалізації автоматизованого вимірювального контролю концентрації  $\text{CO}_2$  в реальному режимі протікання технологічного процесу не забезпечують необхідної швидкодії, а два останні є складними в реалізації і дорогими для впровадження у виробництво.

Тому для подальших досліджень розглянемо метод, що реалізує алгоритм послідовного наближення.

Сутність [37-39] алгоритму послідовного наближення напруг полягає у зрівноваженні вимірюваної напруги  $U_x$  компенсуючою напругою  $U_k$ , яка змінюється рівномірними (ступенями) квантами  $h$ . Цей алгоритм називають ще «молодшими розрядами вперед».

На (рис. 2.2) наведено структурну схему цифрового перетворювач напруга – код послідовного наближення.

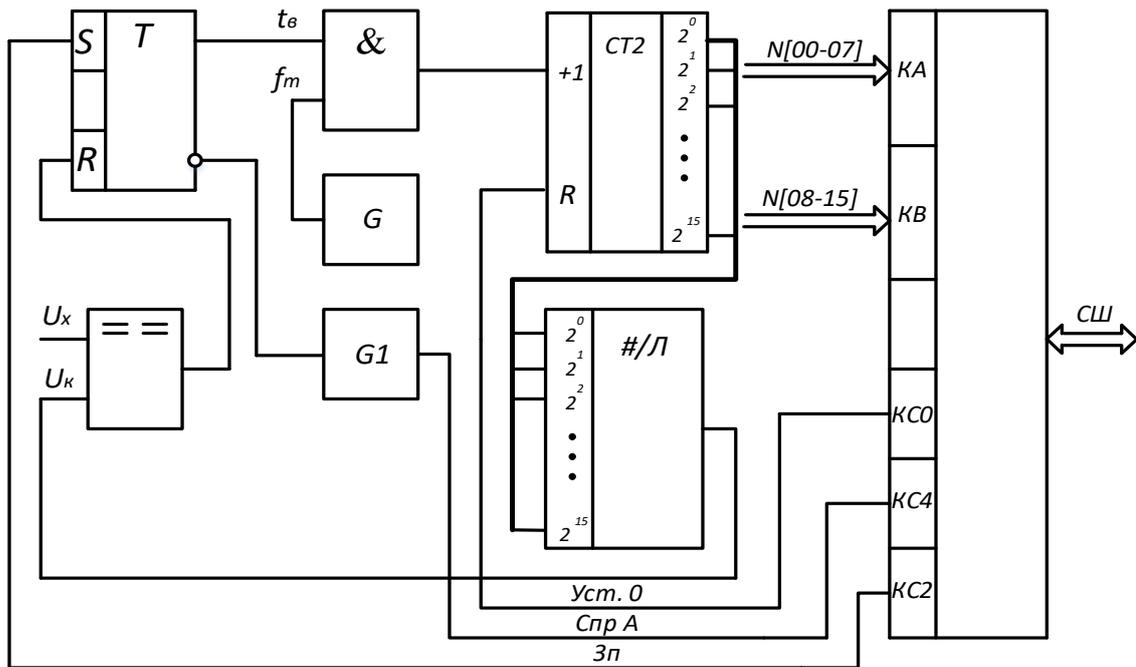


Рисунок 2.21 – Структурна схема вимірювального каналу напруги

Основними елементами даного засобу вимірювання є: компаратор; RS-тригер Т; логічна схема «2-І»; генератор тактової  $f_T$  частоти G; одновібратор G1; двійковий лічильник СТ2; цифро-аналоговий перетворювач ЦАП; паралельний інтерфейс PPI; СШ – система шина мікропроцесорної системи.

Розглянемо принцип дії вимірювального каналу напруги послідовного наближення у двох його станах (положеннях).

Вихідне положення. Сигналом «Уст.0», що формує джерело живлення, RS-тригер Т, тригери двійкового лічильника СТ2 і буферних регістрів (портів) PPI встановлюються в нульові стани. Рівнем логічного нуля з виходу тригера Т логічна схема «2-І» закрита і імпульси тактової частоти  $f_T$  з виходу кварцового резонатора G не надходять на вхід двійкового лічильника СТ2. Рівні логічних нулів з паралельних виходів двійкового лічильника надходять на відповідні

входи ( $2^0, 2^1, \dots, 2^{15}$ ) цифро-аналогового перетворювача, який нульове значення двійкового коду на його цифрових входах перетворює на нульове значення вихідної компенсувальної напруги  $U_K$ . В результаті на першому вході компаратора ( $U_x$ ) присутнє значення вимірюваної напруги, а на другому його вході нульове значення напруги  $U_K=0$  В. Оскільки на обох входах компаратора різні значення напруг  $U_x \neq U_K$  на його виході присутній рівень логічного «0», який присутній на R-вході RS-тригера Т. На S-вході RS-тригера Т також логічний «0» з виходу КС2 паралельного інтерфейсу PPI. Схема знаходиться в стані очікування сигналу «Зп», що є командою на початок вимірювань.

Вимірювання. За командою запуск «Зп» (момент часу  $t_1$ ) тригер Т встановлюється в одиничний стан і відкриває раніше закриту логічну схему «2-І». Імпульси тактової частоти  $f_T$  із виходу генератора G через відкриту схему «2-І» надходять на інкрементувальний вхід (+1) двійкового лічильника СТ2, збільшуючи тим самим значення на 1 двійкового коду на його виходах. З паралельних цифрових виходів лічильника СТ2 двійковий код надходить на цифрові входи ЦАП і там перетворюється в аналогову компенсуючу напругу  $U_K$ .

#### Формування ступінчато-квантованої напруги

Для зрівноваження напруг виникає задача формування ступінчато-квантованої напруги  $U_K$ , що змінюється рівномірними квантами  $h$  з нульового  $U_K = 0$  В і до максимального значення  $U_{K_{\max}}$ . В зв'язку з тим, що діапазон можливої зміни напруг на вході вимірювальних каналів напруг стандартизовано – від 0 В до 10 В (або від – 5 В до + 5 В) максимальне значення встановлюють таким  $U_{K_{\max}} = 10, 24$  В (або 5.12 В).

Забезпечують такий діапазон зміни ступінчато-квантованої напруги  $U_K$  за допомогою двійкового лічильника, що працює сумісно з цифро-аналоговим перетворювачем (рис.2.22).

З приходом кожного тактового імпульсу  $f_T$  на вхід двійкового лічильника СТ2 його стан збільшується на одиницю. Двійковий код з виходів СТ2 ( $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ ) поступає на цифрові входи цифро-аналогового перетворювача і перетворюється в ступінчато-змінну напругу  $U_K$ . Зміна компенсувальної напруги

$U_K$  здійснюється послідовно рівномірними квантами, починаючи з молодшого розряду

$$h = \frac{U_0}{2^n},$$

де  $n$  – кількість розрядів двійкового лічильника (цифро-аналогового перетворювача).

Їхня розрядність (лічильника СТ2 і ЦАП) однакова і для практичних задач може бути рівною  $n = 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24$ .

$U_0$  – опорна (зразкова) напруга, що формується внутрішнім джерелом опорної напруги цифро-аналогового перетворювача.

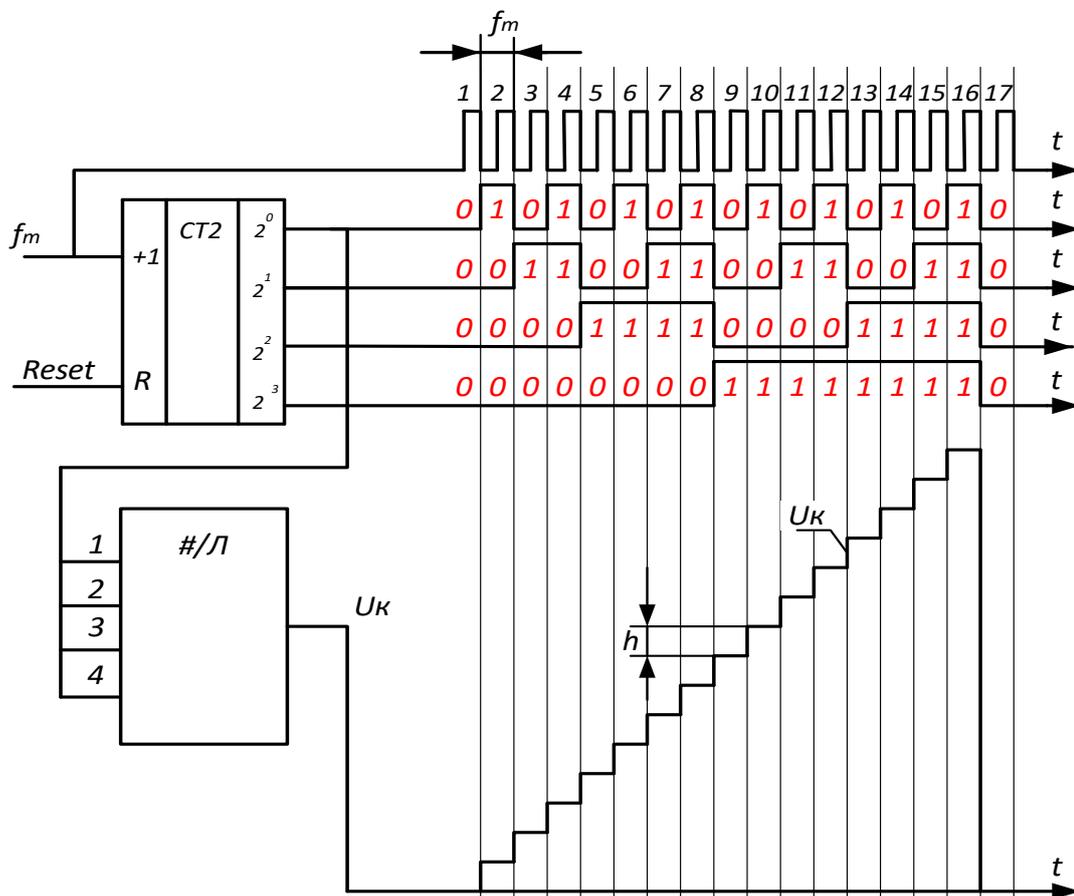


Рисунок 2.22 – До питання формування компенсувальної напруги

Для уніполярної вхідної напруги опорну напругу вибирають рівною  $U_0=10,24$  В, а для біполярної  $U_0=5,12$  В.

Максимальна кількість квантів  $h$  [32-33] в процесі зростання  $U_K$  від нульового значення ( $U_K=0$  В) до максимального  $U_{Kmax}$  визначається розрядністю  $n$  лічильника СТ2

$$N_{max} = 2^n.$$

Час (швидкодія) цифро-аналогового перетворення [35-36,38] двійкового коду в аналогову напругу  $U_K$  визначається так

$$t_B = N \cdot T_T,$$

де  $T_T$  – період тактової частоти  $f_T$ .

#### Квантування вимірюваної напруги

Квантування [31,33,36-38] вимірюваної напруги  $U_X$  здійснюється в компараторі (рис.2.23.а), шляхом її порівняння з кроком квантування  $h$  (2.23.б). Протягом часу вимірювання  $t_B$  в двійковий лічильник СТ2 надійде  $N$  імпульсів тактової частоти  $f_T$ .

Надходження кожного імпульсу  $f_T$  від генератора  $G$  формує нову сходинку  $h$  компенсуювальної напруги  $U_K$  на виході цифро-аналогового перетворювача. У момент часу, коли  $U_X = U_K$ , тригер  $T$  сигналом з виходу компаратора встановлюється в стан логічного «0» і тим самим закриває логічну схему «2-І».

В результаті порівняння вимірюваної напруги  $U_X$  з кроком квантування  $h$  (зразкова величина) СТ2 зафіксує таку кількість імпульсів

$$N = \frac{U_X}{h}.$$

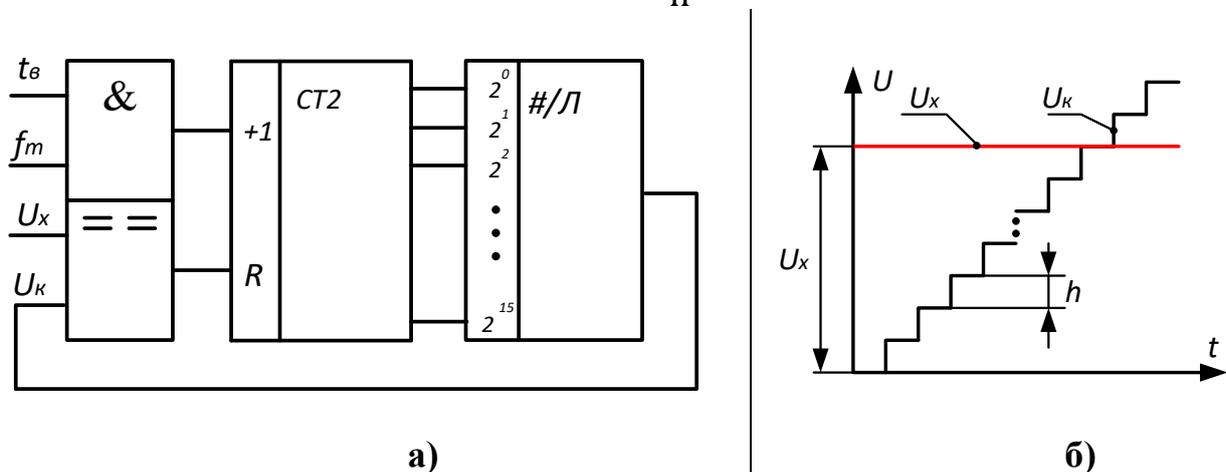


Рисунок 2.23 – До квантування напруги  $U_X$

З урахуванням того, що  $h=U_0/2^n$  остаточне рівняння перетворення приймає такий остаточний вид

$$N = \frac{U_X}{h} = \frac{U_X}{U_0} \cdot 2^n. \quad (2.14)$$

З (2.14) отримаємо залежність для визначення числового значення вимірної напруги

$$U_X = N \cdot \frac{U_0}{2^n}. \quad (2.15)$$

Похибка квантування

В результаті заміни аналогової величини  $U_X$ , що має нескінченну кількість значень, ступінчато-квантованою з обмеженою кількістю  $N$  значень виникає похибка квантування (рис.2.24).

Максимальне значення абсолютної похибки квантування [31,33,36-38] не перевищує половини кроку квантування

$$\Delta_K = \frac{1}{2} h.$$

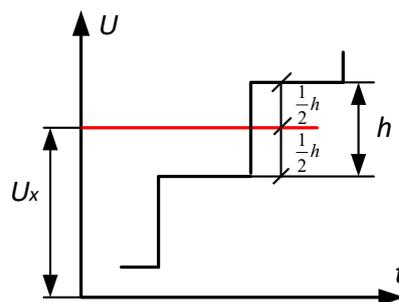


Рисунок 2.24

На відміну від абсолютної, відносна похибка квантування [31,33,36-38] дозволяє оцінити якість вимірювань

$$\delta_K = \frac{\Delta_{K \max}}{N} \cdot 100\%, \quad (2.16)$$

На підставі того, що максимальне значення абсолютної похибки квантування не перевищує кроку квантування

$$\Delta_{K \max} = h,$$

то рівняння (3.2) відносної похибки квантування подають у такому вигляді

$$\delta_K = \frac{h}{N} \cdot 100\%. \quad (2.17)$$

В зв'язку з тим, що значення двійкового лічильника зростає на +1 молодшого розряду, або на  $h$ , то для спрощення оцінювання відносної похибки квантування використовують в практиці вимірювань, таку залежність

$$\delta_K = \frac{1}{N} \cdot 100\%. \quad (2.18)$$

### 2.3.3 Комп'ютерне моделювання принципу дії вимірювального каналу напруги послідовного наближення

В основу побудови комп'ютерної моделі в середовищі програмного забезпечення Micro-Cap покладемо структурну схему (рис.2.19) вимірювального каналу напруги послідовного наближення.

Для отримання комп'ютерної моделі (рис.2.25) необхідно спочатку зібрати схему в середовищі Micro-Cap 9.

Для цього на робочому полі необхідно розмістити [30]:

- джерело постійної напруги (елемент Battery B);
- аналоговий компаратор (елемент Comparator з вкладок Analog Primitives – Macros) та задайте наступні параметри у його меню: Param: VIL=0, Param: VIH=0, Param: VOL=0, Param: VOH=5;
- RS – тригер (елемент SRFF з вкладок Digital Primitives / Gated Flip-Flops/Latches);
- генератор тактових імпульсів (елемент DClock з вкладок Digital Primitives / Stimulus Generators);
- елемент логічного “І” з двома входами (елемент And2 з вкладок Digital Primitives / Standard Gates / And Gates);
- три елементи логічної одиниці (елемент Pullup з вкладок Digital Primitives / Pullups/Pulldowns);
- 7-розрядний двійковий лічильник (елемент 74HC4024 з вкладок Digital Library / 74xx1000- – 4002-);
- 8 – розрядний цифро-аналоговий перетворювач (елемент DtoA8 з вкладок Digital Primitives / DtoA Converters);
- логічний елементи «НІ» (елемент Inverter з вкладок Digital

Primitives / Standard Gates / Inverters);

- задавач аналогового сигналу (елемент Fixed Analog з вкладок Analog Primitives – Waveform Sources).

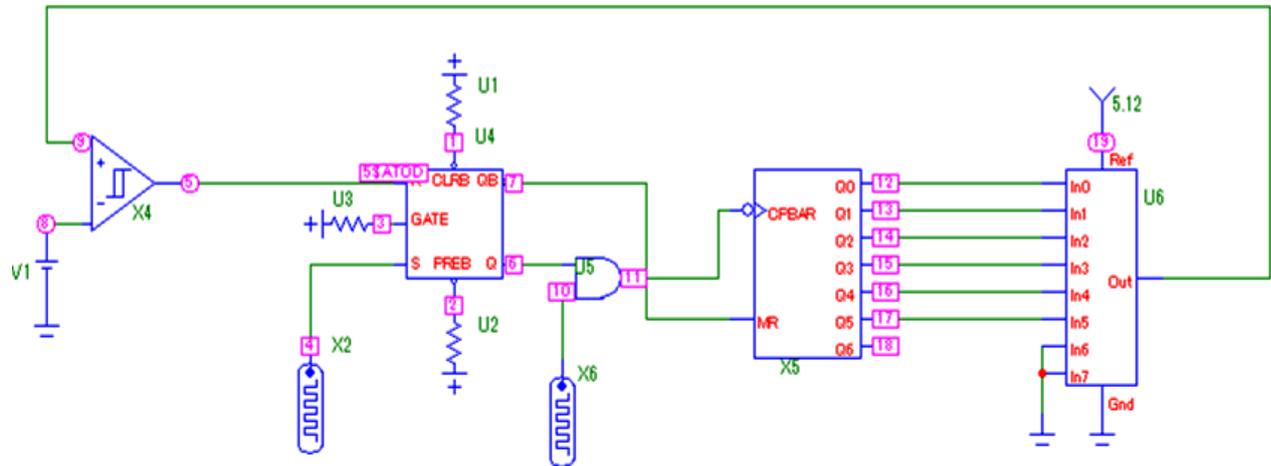


Рисунок 2.25 – Комп’ютерна модель вимірювального каналу напруги

Вихідні дані для комп’ютерного моделювання.

1. На другому (V1) вході компаратора (X4) задамо значення напруги, що сформується на виході сенсора концентрації CO<sub>2</sub>, згідно до його рівняння перетворення (2.17). Наприклад, для концентрації P=2000ppm

$$U = b \cdot P = 0.005 \cdot 2000 = 1 \text{ [V]}.$$

2. Оскільки вимірювана напруга на вході вимірювального каналу не перевищує 5 В

$$1 \text{ [V]} \leq 5 \text{ [V]},$$

то значення опорної напруги U<sub>0</sub> для цифро-аналогового перетворювача U6 задамо рівним

$$U_0 = 5.12 \text{ [V]}.$$

3. Розрядність цифро-аналогового перетворювача згідно до схеми, що наведена на рис.2.19, дорівнює

$$n = 8.$$

4. Тоді значення кроку квантування буде становити

$$h = \frac{U_0}{2^n} = \frac{5.12 \text{ В}}{2^8} = 0.02 \text{ [V]}.$$

5. Частоту квантування на виході генератора тактових імпульсів DClock задамо рівною f<sub>T</sub>=10<sup>6</sup> Гц.

Отже, тривалість імпульсу (параметр ONEWIDTH) та тривалість паузи (параметр ZEROWIDTH) генератора тактових імпульсів DClock\_X6 задамо рівними половині значення періоду  $T_T$  генератора тактової частоти (табл.3.1)

$$T_T = \tau_i + \tau_{\Pi} = 500 \text{ [нс]} + 500 \text{ [нс]},$$

де  $T_T = \frac{1}{10^6} 10^{-6} \text{ [с]} = 1 \text{ [мкс]}$  тривалість періоду тактової частоти.

6. Визначимо параметри сигналу Зп, який за своєю сутністю є кроком дискретизації  $T_d$ .

$$t_b = T_d = N \cdot T_T = \frac{U}{h} \cdot T_T = \frac{1 \text{ В}}{0.02 \text{ В}} \cdot 1 \text{ мкс} = 50 \text{ мкс}.$$

Для забезпечення наочності результатів моделювання для генератора DClock X2, що формує сигнали Зп, задамо такі його параметри

$$T_d = \tau_i + \tau_{\Pi} = 10 \text{ нс} + 100 \text{ мкс}.$$

Результати розрахунків зведемо в табл.2.4.

Таблиця 2.4 – Вихідні дані для моделювання

$U_o$	$T_0$	P	U	n	h	N	$T_d$	
							нс	мкс
В	нс	ppm	В	-	В	-	нс	мкс
5.12	$\tau_i = \tau_{\Pi} = 500 \text{ Н}$	2000	1.00	8	0.02	50	10 Н	100 У

Результати моделювання вимірювального каналу напруги наведено на рис.2.26. У верхній частині діаграми показано, як ступінчато-квантована напруга (чорний колір) з виходу ЦАП, компенсує вимірювану напругу рівну 1 [В] (синій колір). Короткий прямокутний імпульс Зп (фіолетовий колір) тривалістю імпульса 10 нс і тривалістю паузи 100 мкс встановлює тригер U4 по S-входу в стан логічної «1», яка на час вимірювання  $t_b$  відкриває логічну U5 схему «2-І» - (червоний колір). Через відкриту схему U5 у двійковий 7-ми розрядний лічильник X5 поступає певна кількість періодів  $T_0$  (синій колір) зразкової частоти  $f_0$ .

Кількість імпульсів N в десятковій, двійковій і шістнадцятиричній системах, що еквівалентні вимірюваній напрузі 1 [В] наведено в табл.2.5.

Таблиця 2.5 – Десяткові, двійкові і шістнадцятирічні коди кількості імпульсів N

$2^5$	$2^4$	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
32	16	8	4	2	1
1	1	0	0	1	1

**Примітки:**

$$N = 110011_B$$

- у двійковій

$$N = 32 \cdot 1 + 16 \cdot 1 + 8 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1 = 51_D$$

- у десятковій

$$N = 33_H$$

- у шістнадцятирічній

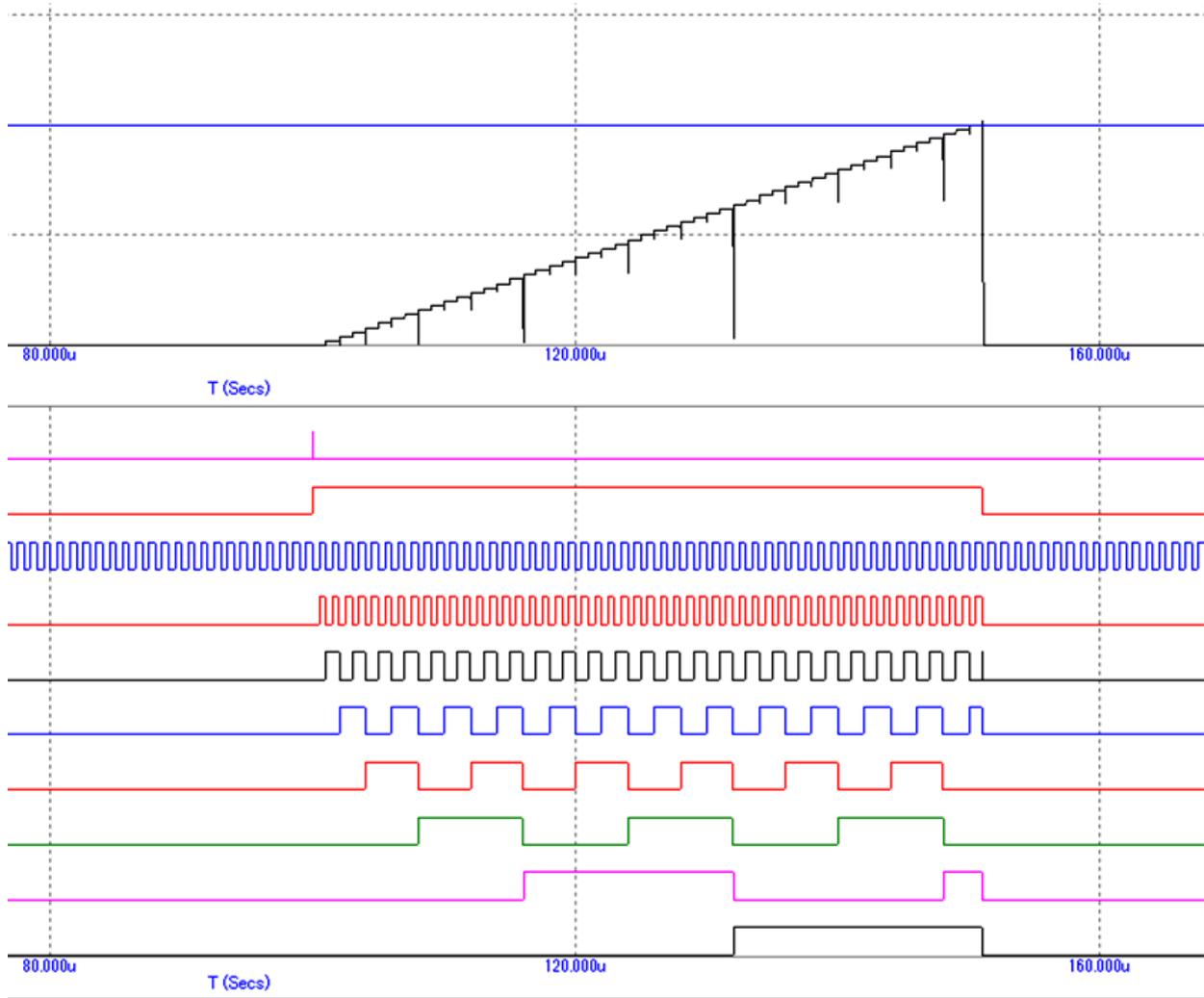


Рисунок 2.26 – Часові діаграми роботи вимірювального каналу напруги

Під імпульсами зразкової частоти  $f_0=10^6$  Гц на часовій діаграмі розташовані виходи тригерів

двійкового лічильника:

- $2^0$  – молодший розряд (чорний колір);
- $2^1$  – наступний розряд (синій колір);
- $2^2$  – наступний розряд (червоний колір);
- $2^3$  – наступний розряд (зелений колір);

- $2^4$  – наступний розряд (фіолетовий колір);
- $2^5$  – старший розряд (чорний колір).

Експериментальне визначення кількості імпульсів

Порівняльна характеристика теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень наведена в табл.2.6.

Таблиця 2.6 – Порівняння результатів теорії і експерименту

U <sub>x</sub> , В	Експериментальні значення			Розрахункові значення			
	N <sub>екс</sub>		δ <sub>кв</sub> , %	N <sub>теор</sub>		δ <sub>кв</sub>	Δ <sub>кв</sub>
	Двійковий	Десятковий		Двійковий	Десятковий	%	мВ
1.0	11 0011 В	51 D	$\delta_k = \frac{100\%}{51} = 1.96\%$	11 0010 В	50 D	$\frac{100\%}{50} = 2.0\%$	20

Висновки:

1. Результати теорії і експерименту співпадають, що підтверджує адекватність комп'ютерної моделі (рис.2.23) і розробленої структурної схеми вимірювального каналу напруги (рис.2.19).

2. Відмінність між кількістю імпульсів результатів експерименту і розрахунку підтверджує наявність абсолютної похибки квантування, яка може складати  $\pm 1$  молодшого розряду. У нашому випадку +1 МР.

#### 2.3.4 Структурна схема і алгоритм роботи вимірювального каналу концентрації CO<sub>2</sub>

Якщо доповнити [39] структурну схему вимірювального каналу напруги послідовного наближення (рис.2.19) вимірювальним перетворювачем концентрації в напругу, то отримаємо структурну схему вимірювального каналу неелектричної величини – концентрації вуглекислого газу CO<sub>2</sub> (рис.2.27).

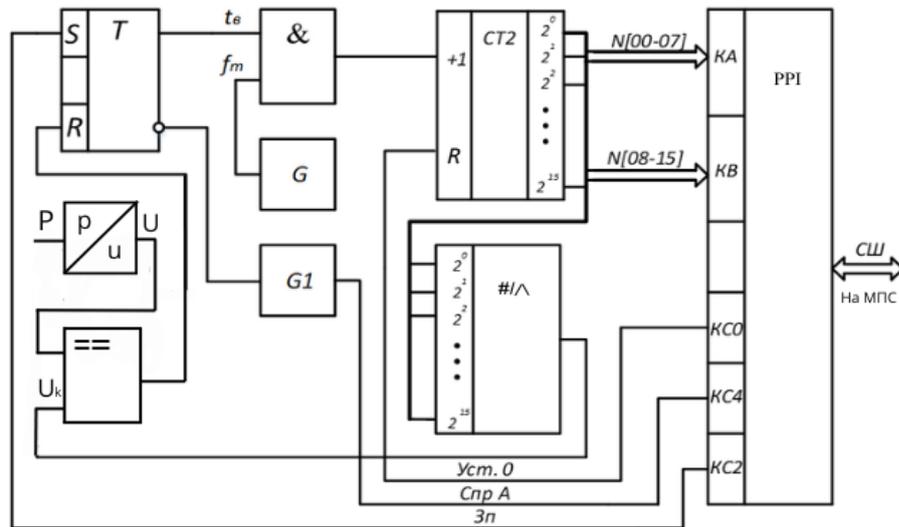


Рисунок 2.27 – Структурна схема вимірювального каналу концентрації CO<sub>2</sub>

Схема запропонованого вимірювального каналу працює згідно до алгоритму.

### 2.3.5 Метрологічні моделі вимірювального каналу концентрації CO<sub>2</sub>

Основою для всіх метрологічних моделей, які ще називають статичними метрологічними характеристиками [31-33] є функція перетворення вимірювального каналу неелектричної величини. В основу її побудови кладуть рівняння перетворення вимірювального каналу напруги (2.14) в яке замість  $U_x$  підставляють рівняння (2.13) перетворення сенсора концентрації CO<sub>2</sub>.

$$N = \frac{U_x}{h} = \frac{b \cdot P}{h} = \frac{b \cdot 2^n}{U_0} \cdot P. \quad (2.19)$$

Графічне подання (рис.2.28) функції перетворення (2.19) називають статичною характеристикою [31-33] вимірювального каналу.

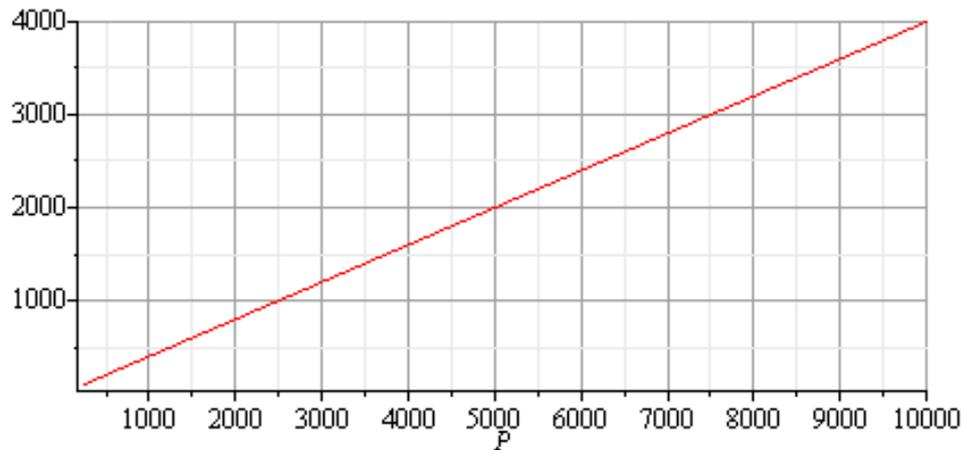


Рисунок 2.28 – Статична характеристика вимірювального каналу

В зв'язку з тим, що чутливість вимірювального каналу

$$S = \frac{d}{dP} N = \frac{b}{h} = \frac{b \cdot 2^n}{U_0} = \text{const}, \quad (2.20)$$

то статична характеристика лінійна.

З аналізу рівняння чутливості (2.20) можна зробити такі висновки:

- чутливість в діапазоні зміни вимірюваної концентрації  $P$  є сталою величиною, що є ознакою рівномірності шкали;
- значення чутливості зростає при збільшенні розрядності  $n$  двійкового лічильника та при зменшенні опорної напруги  $U_0$  цифро-аналогового перетворювача.

В результаті заміни аналогової величини (концентрації  $P$  вуглекислого газу), що має нескінчену кількість значень, обмеженою  $N$  кількістю значень двійкового коду виникає похибка квантування

$$\delta_k = \frac{1}{N} \cdot 100\% = \frac{U_0}{b \cdot 2^n P} \cdot 100\%. \quad (2.21)$$

Графічне подання залежності відносної похибки в діапазоні зміни вимірюваної концентрації  $P$  наведено на (рис. 2.29).

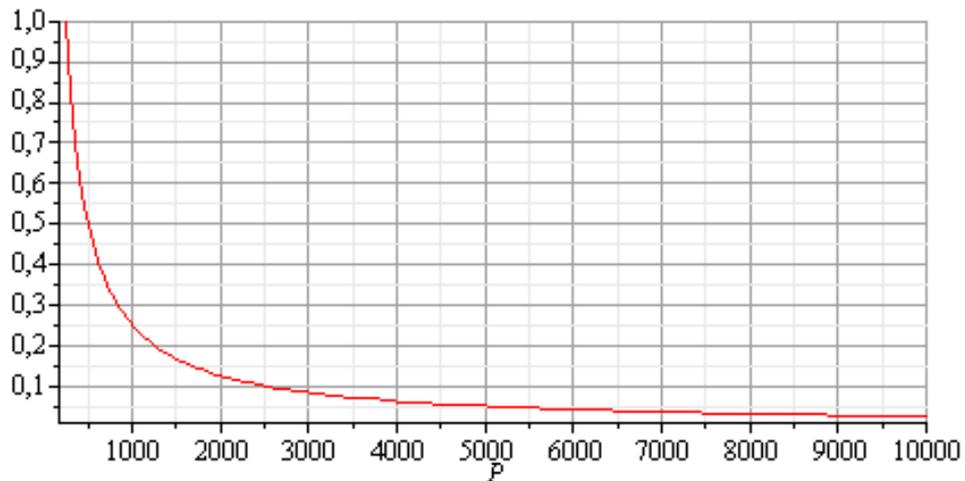


Рисунок 2.29 – Відносна похибка квантування

Аналіз результатів, наведених на рис.2.29 показує, що на початку діапазону вимірюваної концентрації значення відносної похибки квантування велике (може досягати 1%). Вимірювання великих значень концентрації отримують точніше (з меншою похибкою квантування). Наведений аналіз є якісним.

Для отримання числових значень визначимо діапазон вимірювання, що характеризується нижньою і верхньою межами вимірювання, в якому цифровий перетворювач напруги забезпечує нормоване значення похибки квантування  $\delta_{\text{кн}}$ .

Більш детальний аналіз зміни похибки квантування (рис.2.29) дозволяє дійти таких висновків:

- на початку діапазону вимірювання значення відносної похибки квантування велике. При зростанні вимірюваної величини значення відносної похибки квантування зменшується;
- якщо з метрологічного ряду класів точності задатися нормованим значення похибки квантування  $\delta_{\text{кн}} = 0.5\%$ , то цьому значенню (рис.2.30) відповідатиме нижня межа вимірювання  $P_{\text{min}}=250$  ppm. А класу точності  $\delta_{\text{кн}} = 0.25\%$ , відповідатиме  $P_{\text{min}}=1000$  ppm.

Виходячи з цього, очевидним є та обставина, що **нижня межа вимірювання** обмежена нормованим значення похибки квантування [31,38]

$$\delta_{\text{кн}} = \frac{U_0}{b \cdot 2^n \cdot P_{\text{min}}} \cdot 100\%. \quad (2.22)$$

Звідки

$$P_{\text{min}} = \frac{U_0}{b \cdot 2^n \cdot \delta_{\text{кн}}} \cdot 100\%. \quad (2.23)$$

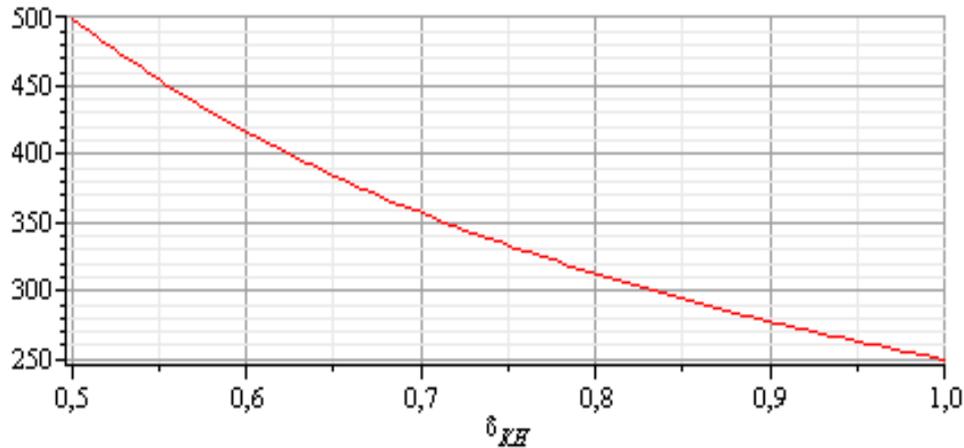


Рисунок 2.30 – Нижня межа вимірювання

**Верхня межа вимірювання** обмежена [31,38] максимальною ємністю  $N_{\text{max}}=2^n$  двійкового лічильника. До такого висновку можна дійти проаналізувавши статичну характеристику вимірювального каналу концентрації, що наведена на рис.2.28. Чим більше виміряне значення концентрації  $\text{CO}_2$ , тим має бути більшою ємність двійкового лічильника  $N_{\text{max}}$ . А ємність двійкового лічильника обмежена його розрядністю  $n$ .

Тому

$$N_{\text{max}} = 2^n = \frac{b \cdot P_{\text{max}}}{h}.$$

Звідки

$$P_{\text{max}} = \frac{2^n \cdot h}{b}. \quad (2.24)$$

Для того, що б отримати графічну залежність верхньої межі вимірювання  $P_{\text{max}}$  від розрядності  $n$  двійкового лічильника, необхідно кількісно оцінити інформацію під час вимірювання концентрації.

### **Оцінювання кількості інформації**

Інформацію, що отримують під час вимірювань концентрації, кількісно оцінюють [39-40] зменшенням ентропії  $H(X)$ , що характеризує невизначеність

фізичної величини перед вимірюваннями, до значення  $H(X/\Delta)$ , яке залишається після отримання результату вимірювання

$$I = H(X) - H(X/\Delta).$$

Ці оцінки невизначеності у вигляді ентропії до і після вимірювань можна визначити на підставі 16-ої теореми К. Шеннона, яка описується функціоналом

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} P(X) \log_2 P(X) dX.$$

### До вимірювання – Априорна ентропія:

Для вимірювання концентрації використано вимірювальний канал (рис.2.25), в якого діапазон вимірювання характеризується нижньою  $P_{\min}$  і верхньою  $P_{\max}$  межами вимірювання.

Тоді ймовірності (рис.2.31) отримати результат вимірювання в області зміни  $P$  від  $-\infty$  до  $P_{\min}$  і від  $P_{\max}$  до  $+\infty$  дорівнюють нулю.

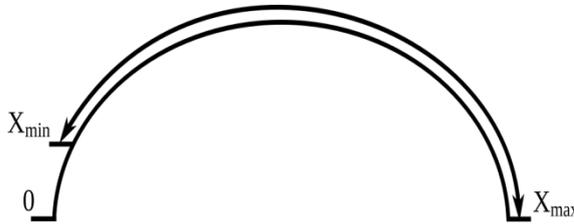
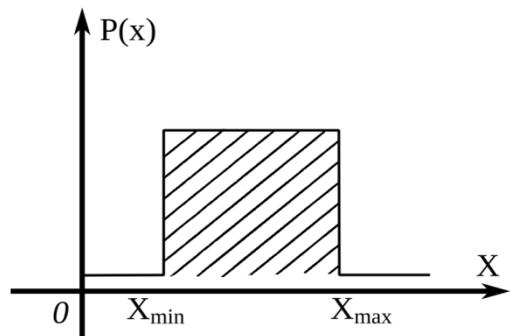
ДО ВИМІРЮВАННЯ	АПРІОРНА ЕНТРОПІЯ
	$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} P(X) \log_2 P(X) dX$ $H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot \log_2 \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} dX$
<p><math>P(X) = 0</math> при <math>X &lt; X_{\min}</math> і <math>X &gt; X_{\max}</math>.</p> <p>Ймовірність отримати результат вимірювання в цій області зміни <math>X</math> дорівнює нулю.</p> $P(X) = \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} \quad \text{при } X_{\min} \leq X \leq X_{\max};$ <p>Результат вимірювання фізичної величини необхідно очікувати в даному діапазоні.</p>	<p><b>РІВНОМІРНИЙ ЗАКОН РОЗПОДІЛУ</b></p> 

Рисунок 2.31 – До питання невизначеності до вимірювання

Отже, результат вимірювання фізичної величини  $X$  необхідно очікувати (рис.2.31) в діапазоні вимірювання від  $P_{\min}$  і до  $P_{\max}$ .

Припустимо, що результат вимірювання з рівною ймовірністю може попасти в будь-яку частину цього діапазону. Тому

$$P(X) = \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} \quad \text{при } X_{\min} \leq X \leq X_{\max};$$

$$P(X) = 0 \quad \text{при } X < X_{\min} \text{ і } X > X_{\max}.$$

З врахуванням останнього, **апостеріорна ентропія** до вимірювання визначається

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} \log_2 \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} dX.$$

Після вимірювання – Апостеріорна ентропія:

Після виконання вимірювання (рис.2.32) ентропія не може бути зменшена до нуля, тому що завжди залишається невизначеність, що вносить похибка.

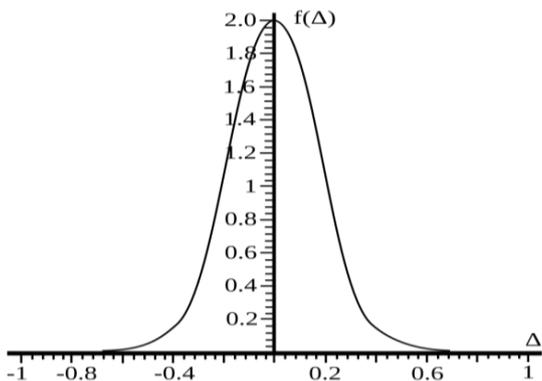
ПІСЛЯ ВИМІРЮВАННЯ	АПОСТЕРІОРНА ЕНТРОПІЯ
	$H(X/\Delta) = - \int_{-\infty}^{+\infty} P(X/\Delta) \log_2 P(X/\Delta) dX =$ $= - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right) \log_2 \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right) dX =$ $= \log_2(\sigma \sqrt{2\pi \cdot e})$
$P(X/\Delta) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right)$ $\Delta = v_i - \bar{\Delta} \text{ (ВИПАДКОВА ПОХИБКА)}$ $\sigma - \text{СКВ}$	<p style="text-align: center;"><b>НОРМАЛЬНИЙ ЗАКОН РОЗПОДІЛУ</b></p> 

Рисунок 2.32 – До питання невизначеності після вимірювання

Визначимо диференційну залишкову ентропію для випадку, коли похибка вимірювання розподілена за нормальним законом а її середнє квадратичне відхилення дорівнює  $\sigma$

$$P(X/\Delta) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right).$$

Тоді апостеріорна ентропія (після) вимірювань, визначається

$$\begin{aligned} H(X/\Delta) &= - \int_{-\infty}^{+\infty} P(X/\Delta) \log_2 P(X/\Delta) dX = \\ &= - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right) \log_2 \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right) dX \end{aligned}$$

Розв'язок останнього рівняння отримано К. Шенноном і має такий остаточний вигляд

$$H(X/\Delta) = \log_2(\sigma \sqrt{2\pi \cdot e}).$$

Кількість інформації, що отримує оператор в процесі вимірювання фізичної величини  $X$ , визначається різницею апіорної і апостеріорної ентропії

$$I = H(X) - H(X/\Delta) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} \log_2 \frac{1}{X_{\max} - X_{\min}} dX - \log_2(\sigma \sqrt{2\pi \cdot e}).$$

### Приклад:

Визначити, яку кількість інформації отримує оператор під час перетворення концентрації  $\text{CO}_2$  у двійковий код цифровим вимірювальним каналом (рис.2.19) з визначеними вище метрологічними характеристиками:

- нижня межа вимірювання  $P_{\min} = 250 \text{ ppm}$ ;
- верхня межа вимірювання  $P_{\max} = 10\,000 \text{ ppm}$ ;
- середньо квадратичне відхилення похибки  $\sigma \in 1 \dots 5 \text{ ppm}$ .

$$I = H(P) - H(P/\Delta) = -\frac{1}{10\,000-250} \cdot \log_2\left(\frac{1}{10\,000-250}\right) \cdot (10\,000 - 250) - \log_2(\sigma\sqrt{2\pi \cdot e}) = 11 \text{ біт}$$

Залежність кількості інформації від середнього квадратичного відхилення наведена на (рис.2.33).



Рисунок 2.33 – До питання визначення кількості інформації

Графічна залежність верхньої межі вимірювання  $P_{\max}$  від розрядності  $n$  двійкового лічильника наведена на (рис.2.34).

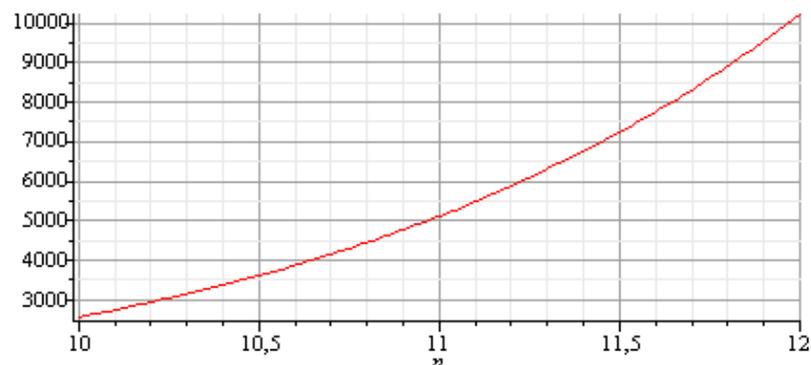


Рисунок 2.34 – Верхня межа вимірювання

З рис.2.34 можна зробити такий висновок: 12-ти розрядний цифровий канал забезпечує вимірювання концентрації  $\text{CO}_2$  в діапазоні від 250 ppm до 10 000 ppm з нормованим значенням відносної похибки квантування  $\delta_{\text{кв}} \leq 0.5\%$ ,

що у повній мірі забезпечує діапазон вимірювання концентрації вуглекислого газу сенсором NDIR EE872.

### **Висновки:**

Вдосконалено нелінійну математичну модель інфрачервоного вимірювального перетворювача у вигляді експоненційної функції перетворення, що однозначно пов'язує між собою вихідну напругу з вимірюваною концентрацією вуглекислого газу. В результаті її математичного моделювання показано, що чутливість такого типу вимірювальних перетворювачів в діапазоні зміни вимірюваною величини є величиною змінюваною та є причиною їхніх недоліків: нерівномірність; не постійний крок дискретизації

Для усунення цих недоліків запропоновано один із можливих шляхів лінеаризації функції перетворення для конкретного типу газу – вуглекислого. Переваги такого підходу підтверджені результатами комп'ютерного моделювання нелінійної і лінеаризованої функцій перетворення.

В результаті аналізу теоретичної і експериментальної функцій перетворення інфрачервоних сенсорів встановлено, що під час вимірювального перетворення неелектричної величини концентрації вуглекислого газу в електричну (постійну напругу) має місце адитивна похибка. Встановлено, що значення цієї складової похибки може сягати на початку діапазону вимірювання неприйнятних значень (25%). Запропоновано автоматизований алгоритм корегування адитивної похибки, який здійснюють безпосередньо в процесі моніторингу концентрації CO<sub>2</sub> в режимі реального часу що дозволяє зменшити її практично до нуля.

Отримано рівняння чутливості, швидкості її зміни, номінальну функцію перетворення та аналітичну залежність для оцінювання похибки нелінійності, які і є основними статичними метрологічними характеристиками сенсора концентрації вуглекислого газу.

Розроблено структурну і функціональну схеми системи автоматизованого контролю і керування концентрацією CO<sub>2</sub> в режимі

реального часу протікання технологічного процесу інкубаційної станції. В середовищі програмного забезпечення Micro Cap 9 здійснено комп'ютерне моделювання вимірювального каналу концентрації CO<sub>2</sub> і підтверджено його працездатність.

Оцінено основні статичні метрологічні характеристики мікропроцесорного вимірювального каналу концентрації вуглекислого газу на основі отриманих рівнянь перетворення і чутливості та відносної похибки квантування, аналітичних залежностей для визначення нижньої та верхньої меж вимірювання.

Запропоновано автоматизований алгоритм корегування адитивної похибки, який здійснюють безпосередньо в процесі моніторингу концентрації CO<sub>2</sub> в режимі реального часу що дозволяє зменшити її практично до нуля.

Результати дослідження можуть бути впроваджені в практику сучасного птахівництва як у масштабних інкубаторних станціях, так і в невеликих фермерських господарствах. Система дозволяє знизити залежність від людського фактору, підвищити енергоефективність та забезпечити стабільні умови для інкубації.

### 3 ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР МІКРОКОНТРОЛЕРА

Мікроконтролер призначений для аналізу, обробки інформації та управління системою вентиляції, а також можливої її передачі на, наприклад, смартфон, або комп'ютер за допомогою інтерфейсів. Для даної функції була вибрана плата керування Arduino Leonardo R3 на базі мікроконтролера ATmega32u4. Зображення Arduino Leonardo R3 (рис. 3.1).

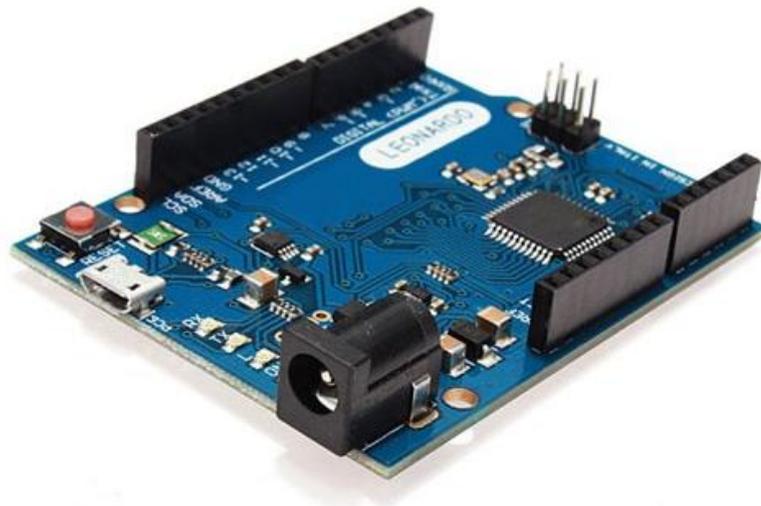


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд плати керування Arduino Leonardo R3

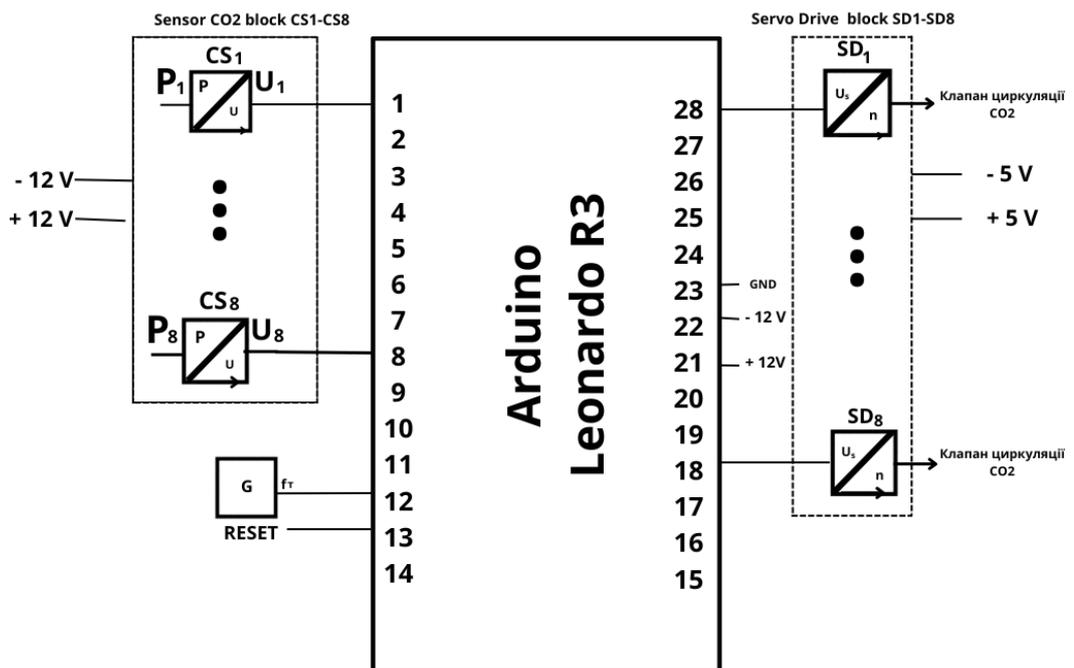


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи контролю та керування на базі плати керування Arduino Leonardo R3.

На структурній схемі зображені елементи які потрібні нам для виконання поставленої задачі. CS1 – CS8 це вісім сенсорів концентрації вуглекислого газу які живляться блоком живлення на 12 В, для зручності читання схеми об'єднані в один блок під назвою Sensor CO2 block CS1 – CS8. G – це генератор тактової частоти який генерує частоту в 16 МГц. RESET – сигнал який потрібний для запуску плати керування. Arduino Leonardo R3 – плата керування яка буде займатись обробкою сигналів від 0 – 5 В з сенсорів вуглекислого газу, та керувати сервоприводами, плата має 28 входів/виходів, які завдяки програмному забезпеченню можна налаштувати як нам потрібно. Servo Drive block SD1 – SD8 – це блок наших сервоприводів які будуть відкривати та закривати клапана циркуляції повітря. Задля економії коштів та рентабельності проєкта вибрано сервопривод який має живлення 5В та може отримувати керуючий сигнал від 0 – 5 В для відкриття/закриття. Для цього потрібно буде встановити ще один блок живлення.

### **3.1 Особливості та архітектура побудови мікроконтролера Arduino Leonardo R3**

Необхідно відзначити наступні особливості плати керування Arduino Leonardo R3:

Мікроконтролер: ATmega32u4.

Робоча напруга: 5 В.

Вхідна напруга (рекомендована): 7-12 В.

Вхідна напруга (гранична): 6-20 В

Цифрові Входи/Виходи: 20 (7 з яких можна використовувати як виходи ШІМ).

Аналогові канали: 12.

Постійний струм через вхід/вихід: 40 мА.

Постійний струм для виводу: 3.3 В 50 мА.

Флеш-пам'ять 32 Кб (АТmega32u4), з яких 4 Кб використовуються для завантажувача ОЗУ 2 Кб (АТmega32u4)EEPROM1 Кб (АТmega32u4).

Тактова частота: 16 МГц.

Живлення:

Arduino Leonardo може отримувати живлення через підключення USB або від зовнішнього джерела живлення. Джерело живлення обирається автоматично.

Зовнішнє живлення (не USB) може подаватися через перетворювач напруги АС/DC (блок живлення) або акумуляторною батареєю. Перетворювач напруги під'єднується за допомогою роз'єму 2.1 мм із центральним позитивним полюсом. Дроти від батареї підключаються до виводів Gnd і Vin роз'єму живлення.

Виводи живлення:

VIN: Вхід використовується для подачі живлення від зовнішнього джерела (за відсутності 5 В від роз'єму USB або іншого регульованого джерела живлення). Подача напруги живлення відбувається через цей вивід.

5V: Регульоване джерело напруги, що використовується для живлення мікроконтролера і компонентів на платі. Живлення може подаватися від виводу VIN через регулятор напруги, або від роз'єму USB, або іншого регульованого джерела напруги 5 В.

GND: Виводи заземлення.

IOREF: Вивід з робочою напругою входів/виходів плати. Для Leonardo це 5 В. Передбачається до використання платами розширення для правильного вибору робочої напруги.

Пам'ять:

Мікроконтролер АТmega32u4 має в своєму розпорядженні 32 кБ флеш-пам'яті, з яких 4 кБ використовується для зберігання завантажувача, а також 2.5 кБ ОЗП (SRAM) і 1 кБ EEPROM (яка зчитується і записується за допомогою бібліотеки EEPROM).

Входи та виходи

Кожен з 20 цифрових виводів Leonardo може налаштований як вхід або вихід, використовуючи функції `pinMode()`, `digitalWrite()`, і `digitalRead()`, . Виводи працюють за напруги 5 В. Кожен вивід має навантажувальний резистор (за замовчуванням відключений) 20-50 кОм і може пропускати до 40 мА. Деякі виводи мають особливі функції:

Послідовна шина: 0 (RX) і 1 (TX). Виводи використовуються для отримання (RX) і передавання (TX) даних TTL. Ці виводи під'єднанні до відповідних виводів мікросхеми послідовної шини ATmega32U4 USB-to-TTL. Зверніть увагу, що у Leonardo, клас `Serial` відноситься до послідовного з'єднання USB CDC. Послідовне з'єднання через виводи 0 і 1 здійснюється через клас `Serial1`.

I2C: 2 (SDA) і 3 (SCL). За допомогою виводів здійснюється зв'язок I2C (TWI), для створення якого використовується бібліотека `Wire`.

Зовнішнє переривання: 2 і 3. Ці виводи можуть бути налаштовані на виклик переривання або на молодшому значенні, або на передньому, або задньому фронті, або під час зміни значення.

ШИМ: 3, 5, 6, 9, 10, 11 і 13. Будь-який з виводів забезпечує ШИМ з роздільною здатністю 8 біт за допомогою функції `analogWrite()`.

SPI: на роз'ємі ICSP. За допомогою цих виводів здійснюється зв'язок SPI, для чого використовується бібліотека `SPI`.

LED: 13. Вбудований світлодіод, під'єднаний до цифрового виводу 13. Якщо значення на виводі має високий потенціал, то світлодіод горить.

Аналогові входи: A0-A5, A6-A11 (на цифрових виводах 4, 6, 8, 9, 10 і 12). Leonardo має 12 аналогових входів, позначених від A0 до A11. Усі аналогові входи можуть працювати в режимі цифрових вхід/виходів. Входи з A0 по A5 збігаються з аналоговими входами UNO. Входи з A6 по A11 на цифрових виводах 4, 6, 8, 9, 10 і 12 відповідно. Роздільна здатність аналогових входів - 10 біт, тобто 1024 різних значення. За замовчуванням значення на аналогових входах вимірюється від землі (0) до 5 Вольт, верхня межа діапазону може бути змінена за допомогою AREF входу і `analogReference()` функції.

Додаткова пара виводів платформи:

AREF: Опорна напруга для аналогових входів. Використовується з функцією `analogReference()`.

Reset: Низький рівень сигналу на виводі перезавантажує мікроконтролер. Зазвичай застосовується для підключення кнопки перезавантаження на платі розширення, що закриває доступ до кнопки на самій платі Arduino.

Зв'язок:

На платформі Arduino Leonardo може встановлювати зв'язок із комп'ютером, іншими пристроями Arduino або мікроконтролерами кількома способами. ATmega32U4 підтримують послідовний інтерфейс UART TTL (5 V), який здійснюють виводами 0 (RX) і 1 (TX). ATmega32U4 дає змогу також організувати послідовне з'єднання з програмами на стороні комп'ютера через USB так, щоб вони «спілкувалися» з платою через віртуальний COM порт. Leonardo за допомогою стандартних драйверів USB COM (для Windows потрібен .inf файл) може підключатися як USB 2.0 пристрій. Моніторинг послідовної шини (Serial Monitor) середовища розробки Arduino дає змогу надсилати й отримувати текстові дані під час під'єднання до платформи. Світлодіоди RX і TX на платформі блиматимуть під час передавання даних через USB-підключення (але не під час використання послідовного передавання через виводи 0 і 1).

Для керування клапанами циркуляції обрано сервопривод: Servo MG996R.

Сервопривод MG996R використовується для повороту деталей різних механізмів. Завдяки редуктору з металевими шестернями на вихідному валу розвивається достатнє зусилля для застосування в рухомих роботах. Усередині корпусу знаходиться невеликий модуль керування, який під дією вхідного сигналу подає живлення відповідної полярності на електродвигун. Вхідний сигнал керування містить дані про необхідне положення валу. Для визначення поточного положення валу редуктор з'єднаний із датчиком положення. Електроніка MG996R обчислює різницю між поточним положенням редуктора та необхідним. Модуль управління орієнтуючись на датчик положення подає

живлення необхідної полярності на двигун для повороту редуктора, що приводить у відповідність положення, що передається сигналом управління і поточне.

Інформація про потрібне положення валу міститься в шпаруватості імпульсів керуючого сигналу. Частота сигналу, що управляє, повинна бути постійна і складати 50 Гц. Шпаруватість – відношення тривалості імпульсу до періоду. Найчастіше при аналізі параметрів сигналу, що управляє, розглядають тривалість імпульсу. Для формування такого сигналу зручно використовувати мікроконтролер, що має функцію широтно-імпульсної модуляції вихідного сигналу.

Характеристики сервопривода:

Металевий привід

Підшипник: пластикова втулка

Довжина провідника 300 мм

Розміри 40x19x43 мм

Кут повороту: 180 градусів

Робоча швидкість: 0.17 сек/60 градусів (4.8В без навантаження)

Робоча швидкість: 0.13 сек/60 градусів (6В без навантаження)

Пусковий момент: 9.4 кг/см при живленні 4.8В

Пусковий момент: 11 кг/см при живленні 6В

Робоча напруга: 4.8 - 7.2В

Розшинування для підключення сервопривода:

Коричнева ( - ); Червоний ( + ); Помаранчевий (управління)

Блок живлення для сервопривода – так як вся система живиться від 12 В, а сервопривод від 5В, необхідно встановити додатковий Б - блок живлення, наш вибір впав на блок живлення 5 В 5А 25 W, даного блока живлення буде достатньо для підключення наших сервоприводів. Так як струмо споживання сервопривода невелике, від 1 БЖ ми маємо змогу заживити усі 8 сервоприводів.

## 3.2 Алгоритм функціонування автоматизованої системи контролю та керування вмістом CO<sub>2</sub>

### Початковий етап — Ініціалізація системи

#### Подача живлення

Після увімкнення живлення (12 В або через USB) відбувається подача напруги на всю систему. Електронні компоненти, включаючи стабілізатори напруги, починають формувати робочу напругу **5 В** для логіки мікроконтролера

#### Сигнал RESET

Після подачі живлення **активується лінія RESET** — внутрішній або зовнішній імпульс, який забезпечує **встановлення контролера у початковий стан**:

- обнуляються регістри;
- ініціалізуються порти введення/виведення;
- запускається головна програма.

#### Зчитування сигналу з датчиків CO<sub>2</sub>

##### Аналоговий сигнал

Кожен з **8 датчиків CO<sub>2</sub>** видає **аналогову напругу (0–10 В)**, пропорційну концентрації CO<sub>2</sub> у повітрі. Для коректного зчитування Arduino Leonardo (яка працює з діапазоном 0–5 В), може використовуватись **дільник напруги** або зовнішній **аналоговий обмежувач**.

##### Перетворення в цифровий код

Аналогові входи мікроконтролера передають сигнал до **вбудованого АЦП (ADC – Analog-to-Digital Converter)**, який виконує:

- **дискретизацію** сигналу (розділення по часу);
- **квантування** — поділ рівня напруги на 1024 градації;
- **перетворення в двійковий код** — результатом є 10-бітне число, яке зберігається у регістрі ADC<sub>n</sub> (n – номер каналу).

##### Розрахунок концентрації CO<sub>2</sub>

Отримане значення обробляється програмно. Наприклад:

$CO2\_ppm = (ADC\_value / 1023.0) * 3\ 000;$  // якщо максимум 3 000 ppm

## Логіка обробки даних

### Перевірка порогових значень

Для кожного каналу:

1. Зчитується значення  $\text{CO}_2$ .
2. Порівнюється з допустимою нормою:
  - якщо  $\text{CO}_2 < \text{поріг}$  → виконання переходить до наступного каналу;
  - якщо  $\text{CO}_2 \geq \text{поріг}$  → активується механізм провітрювання.

### Активація виконавчого механізму

#### Формування керуючого сигналу

У разі перевищення допустимого рівня  $\text{CO}_2$  на одному з каналів:

- мікроконтролер формує **PWM-сигнал (широтно-імпульсна модуляція)** на відповідному цифровому виході (наприклад, D2–D9).
- сигнал передається на **сервопривод**, підключений до відповідного виходу.

#### Відкриття клапана

Сервопривод, отримавши сигнал PWM тривалістю 1.5–2 мс (для кута повороту), **відкриває клапан подачі свіжого повітря.**

#### Контроль тривалості відкриття

У програмі реалізується:

- затримка (наприклад, delay 5000 мс);
- або **зворотній зв'язок** — періодичне зчитування рівня  $\text{CO}_2$  до досягнення допустимого значення.

#### Закриття клапана

Після стабілізації концентрації  $\text{CO}_2$  мікроконтролер подає інший PWM-сигнал — наприклад, 1 мс — для **закриття клапана.**

#### Завершення циклу і повернення в початок

Після завершення обробки:

- виконується перехід до наступного каналу;
- якщо всі 8 каналів перевірено — цикл починається знову.

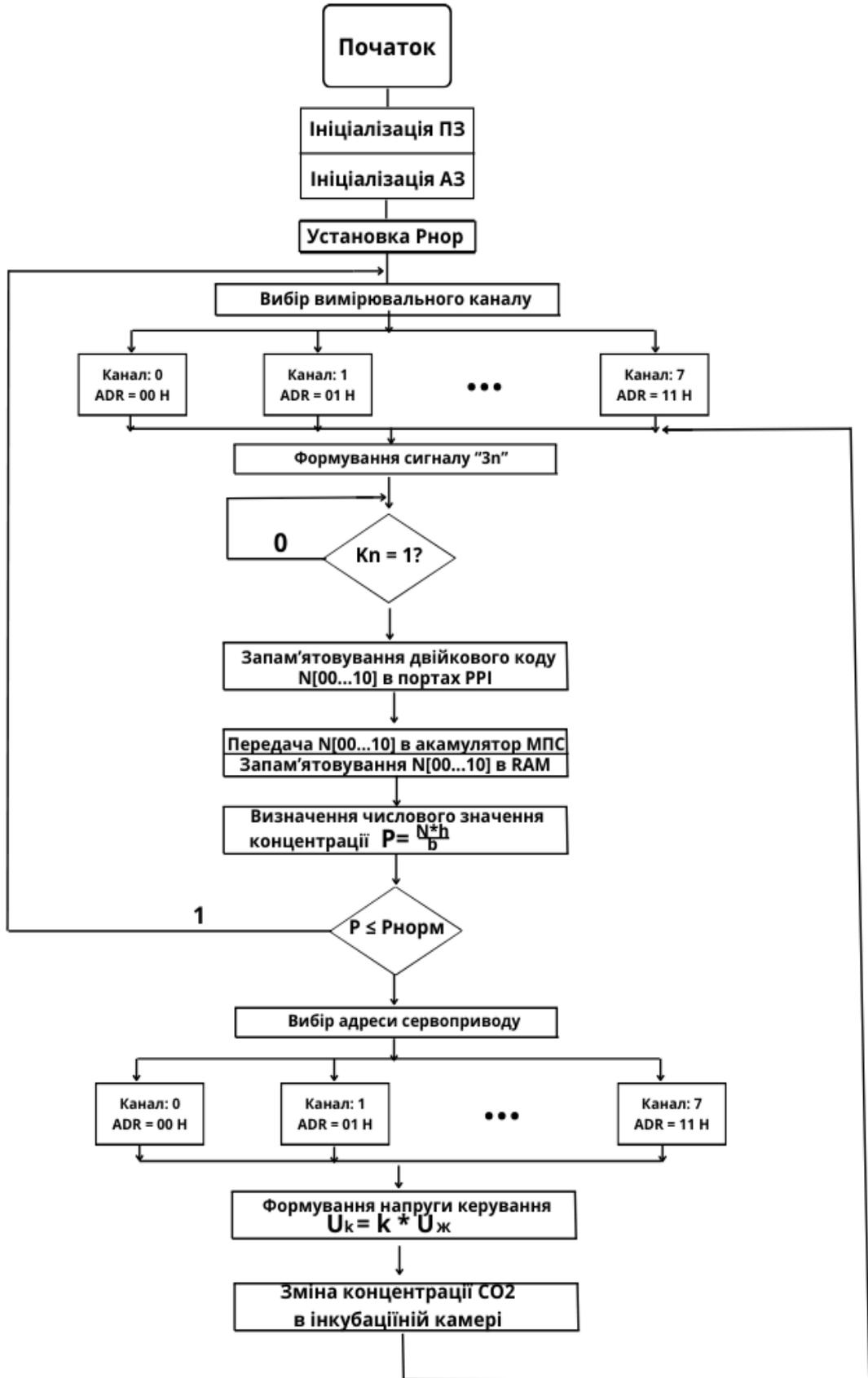


Рисунок 3.3 – Алгоритм роботи системи

Алгоритм взаємодії апаратних і програмних засобів цифрового перетворювача напруга - код, що реалізує метод послідовного наближення наступний.

### **ОСНОВНА ПРОГРАМА**

1. Початок.
2. Ініціалізація програмних засобів вимірювального каналу, в результаті виконання якої встановлюється:
  - Початкова адреса ADR буфера оперативної пам'яті, в який будуть записуватися результати вимірювання напруги  $U_x$ ;
  - Програмний лічильника вимірювань, який задає кількість  $[n]$  вимірювань напруги.
3. Ініціалізація апаратних засобів перетворювача:

**3.1** Спочатку відбувається програмна установка режимів роботи каналів (портів) програмованого інтерфейсу PI:

- канал КА[00-07] програмують на режим «1» - синхронного вводу молодшого байту інформації з цифрових N[00-07] виходів лічильника СТ2 сумісно зі стробувальним розрядом каналу КС;

- канал КВ[08-15] програмують на режим «0» - простого вводу старшого байту інформації з цифрових N[08-15] виходів лічильника СТ2;

- КС[04] – СтрА (строб каналу КА, в якості якого використовується сигнал з виходу одновібратора G1);

- КС[03] – ЗПРА запит на переривання роботи мікропроцесора (на схемі не показано);

- розряд КС[00] на режим «0» - асинхронного виводу сигналу (Уст «0») для обнуління усіх елементів пам'яті.

**3.2** Програмна установка в нульовий стан елементів пам'яті двійкового лічильника СТ2, програмованого паралельного інтерфейсу PPI і RS-тригера Т здійснюється так. Із акумулятора в канал КС (розряд КС[00] записується така послідовність логічних рівнів: «0» «1» «0» - програмне формування одиничного імпульсу Уст «0».

4. Подається команда на дозвіл переривання роботи мікропроцесора.

По завершенню квантування вимірюваної напруги  $U_X$  ступінчато-квантованою  $U_K$  (момент часу  $U_X = U_K$ ) з виходу компаратора поступає одиничний сигнал на формувач G1, який по передньому фронту цього сигналу формує сигнал СтрА.

По сигналу СТРА програмований інтерфейс формує в розряді КС[03] – ЗпрА (на схемі не показано) запит на переривання на роботу мікропроцесора. Мікропроцесор переходить на програму обслуговування переривання.

### ***ПІДПРОГРАМА ОБСЛУГОВУВАННЯ ПЕРЕРИВАНЬ***

а) Зберігання в стековому регістрі проміжних даних акумулятора і регістра прапорців з основної програми.

б) Читання молодшого байту N[00...07] з буферного регістра (порту) програмованого інтерфейсу РРІ а потім старшого байту N[08...09] і їхній запис в акумулятор мікропроцесорної системи МПС.

в) Збільшення (інкрементування) на одиницю  $ADR := ADR + 1$  адреса буфера оперативної пам'яті для зберігання наступних байтів з вимірюваною інформацією.

г) Зменшення (декрементування) на одиницю  $n := n - 1$  значення лічильника вимірювань.

д) Із стеку відновлюється інформація, яка була в акумуляторі до переривання роботи мікропроцесора.

е) Вихід з режиму переривання за допомогою, наприклад команди RET.

### ***ОСНОВНА ПРОГРАМА***

5. Перевіряється на нуль  $n = 0$  лічильник вимірювань. Якщо  $n = 0$ , то процес вимірювань закінчується. Здійснюється умовний перехід на оператор «Кінець».

6. За рівнянням перетворення (16.2) визначають значення вимірюваної напруги

$$U_X = \frac{N_V \cdot U_0}{2^n}$$

і отримують в оперативній пам'яті МПС масив числових значень вимірюваної напруги  $U_x$ .

7. Якщо  $n \neq 0$ , то очікується наступне переривання роботи мікропроцесора.

8. Кінець.

### **Висновки:**

У розділі було обґрунтовано вибір апаратної платформи для побудови автоматизованої системи контролю концентрації вуглекислого газу в інкубаційному середовищі.

У результаті аналізу обрано мікроконтролер **ATmega32u4**, який використовується в платі **Arduino Leonardo**. Основні технічні характеристики мікроконтролера:

- тактова частота — **16 МГц**;
- обсяг Flash-пам'яті — **32 КБ** (з яких 4 КБ зарезервовано для завантажувача);
- оперативна пам'ять SRAM — **2,5 КБ**;
- EEPROM — **1 КБ**;
- кількість аналогових входів — **12**;
- цифрові входи/виходи — **20**, з яких 7 — **PWM**;
- вбудований USB-контролер;
- підтримка інтерфейсів I<sup>2</sup>C, SPI, UART.

Ці параметри повністю відповідають вимогам системи щодо обробки аналогових сигналів від CO<sub>2</sub>-сенсорів та керування виконавчими механізмами.

Як виконавчий пристрій для відкривання заслінки вентиляції обрано **сервопривід постійного струму з робочою напругою 5 В**, що має наступні характеристики:

- тип — **позиційний сервомеханізм** з аналоговим керуванням (широтно-імпульсна модуляція);
- робоча напруга — **5 В**;

- максимальний кут обертання — **180°**;
- час повороту 60° — близько **0,12 с** при навантаженні;
- крутний момент — **2.5 кг·см** (при 5 В);
- інтерфейс керування — **сигнал PWM 0–5 В**.

Сервопривід забезпечує надійне й точне керування заслінкою вентиляції, є енергоефективним, компактним та простим в інтеграції з мікроконтролером.

Таким чином, **комбінація Arduino Leonardo та сервопривода на 5 В** забезпечує повну відповідність функціональним, технічним та економічним вимогам системи автоматизованого контролю рівня CO<sub>2</sub> в інкубаторі.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 4.1 Обґрунтування доцільності впровадження

Інтенсивне птахівництво вимагає точного контролю мікроклімату, зокрема рівня CO<sub>2</sub>, який істотно впливає на життєздатність ембріонів, якість виводу та зниження енергоспоживання. Запропонована система автоматизованого контролю CO<sub>2</sub> базується на мікроконтролері ATmega32U4 з використанням 8 сенсорів CO<sub>2</sub>, сервоприводів для провітрювання та модуля обробки сигналу.

Ручний контроль не забезпечує необхідної точності та частоти вимірювань. Автоматизована система забезпечує:

- зменшення людського фактору;
- підвищення рівня автоматизації;
- економію енергоресурсів;
- підвищення виводу життєздатних пташенят.

### 4.2 Склад системи та джерела витрат

У таблиці 4.1 наведено складові системи та їх вартість:

Таблиця 4.1 - Капітальні витрати на електроустаткування

№	Найменування	Кількість	Ціна за одиницю (грн)	Сума (грн)
1	Arduino Leonardo R3	1	350	1117
2	Датчик CO <sub>2</sub> NDIR (EE872 або аналог)	8	1200	9600
3	Сервопривід MG996R	8	200	1600
4	Блок живлення 12 В	1	300	300
5	Понижуючий модуль 5 В	2	80	160
6	Плата прототипування	1	200	200
7	Корпус	1	250	250
8	Інші витратні матеріали	-	-	150

Загальна вартість становить 13 377 грн.

### 4.3 Розрахунок заробітної плати

Формула для розрахунку заробітної плати:

Загальний обсяг роботи — 120 годин. Середня ставка інженера — 120 грн/год.

$$\text{ЗП} = \text{T} \times \text{C}, \quad (4.1)$$

де: ЗП – заробітна плата,

T – трудомісткість (год),

C – середньогодинна ставка (грн/год).

У нашому випадку:

$$\text{ЗП} = 120 \times 120 = 14\,400 \text{ грн.}$$

$$\text{Нарахування ЄСВ (22\%): } 14\,400 \times 0.22 = 3\,168 \text{ грн.}$$

### 4.4 Розрахунок амортизації

Амортизація обчислюється за формулою:

$$A = B / T, \quad (4.2)$$

Де:

A – амортизаційні відрахування за рік,

B – вартість обладнання,

T – строк експлуатації (роки).

$$\text{Комп'ютер: } A = 20000 / 5 = 4000 \text{ грн/рік}$$

$$\text{Програмне забезпечення: } A = 5000 / 3 = 1667 \text{ грн/рік}$$

$$\text{Разом за місяць: } (4000 + 1667) / 12 \approx 472 \text{ грн.}$$

### 4.5 Інші витрати

$$\text{Витрати на електроенергію: } 0.5 \text{ кВт} \times 30 \text{ днів} \times 6.64 \text{ грн} = 100 \text{ грн}$$

Витрати на обслуговування: 200 грн

#### 4.6 Економічна ефективність

Зменшення смертності ембріонів з 12% до 4%:

$(12\% - 4\%) \times 10\,000$  яєць = 800 пташенят.

При вартості одного пташеняти 25 грн:

Додатковий прибуток =  $800 \times 25 = 20\,000$  грн.

Термін окупності визначається за формулою:

$\text{Ток} = \Sigma \text{витрат} / \text{Додатковий прибуток} = 13\,377 / 20\,000 \approx 0.66$  міс.

#### 4.7 Висновки

Проведений економічний аналіз демонструє високу ефективність запропонованої інноваційної системи інкубації. Ключовою перевагою є швидка окупність інвестицій, що становить менше одного місяця. Це зумовлено значним зниженням втрат інкубаційних яєць завдяки точному контролю мікроклімату, оптимізацією трудових та енергетичних витрат за рахунок автоматизації, а також підвищенням загальної ефективності інкубаційного циклу.

Застосування системи мінімізує втрати ембріонів та молодняку, збільшуючи вихід готової продукції. Автоматизація спрощує контроль, знижує потребу в персоналі та підвищує продуктивність праці. Підвищення ефективності інкубації проявляється у скороченні циклу та покращенні якості пташенят.

Швидка окупність, зниження втрат, спрощення контролю та підвищення ефективності роблять запроповану систему економічно вигідним рішенням. Враховуючи ці переваги, її впровадження на сучасних птахівничих підприємствах є рекомендованим для оптимізації виробництва та підвищення конкурентоздатності.

## 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці — це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, що спрямовані на збереження життя, здоров'я й працездатності працівників у процесі їх трудової діяльності. Згідно із Законом України «Про охорону праці», роботодавець зобов'язаний створити належні умови праці, що відповідають вимогам чинних нормативно-правових актів.

Аналіз причин смертності в Україні свідчить, що саме нещасні випадки у виробничій та невиробничій сферах є головною причиною смерті чоловіків у працездатному віці. Тому питання охорони праці та здоров'я громадян у процесі їх трудової та будь-якої іншої діяльності повинні стати пріоритетними та увійти до розряду найвищого державного рівня, оскільки саме люди, їх життя та здоров'я є найбільшим багатством будь-якої держави. Окрім соціального, охорона праці має, безперечно, важливе економічне значення. Це й висока продуктивність праці, зниження витрат на оплату лікарняних, компенсацій за важкі та шкідливі умови праці тощо. Незадовільний стан охорони праці важким тягарем лягає на економіку держави. Умови та безпека праці, їх стан та покращення – самостійна і важлива задача соціальної політики будь-якої сучасної промислово розвинутої держави, яку вирішує така невід'ємна складова БЖД, як охорона праці.

У цій роботі розглядається питання забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації автоматизованої системи контролю рівня вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) в інкубаційній станції. Це обладнання передбачає застосування мікроконтролерів, електричних приладів, сенсорних модулів, сервоприводів та допоміжних елементів, що можуть створювати низку потенційно шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

В умовах сучасного виробництва актуальність охорони праці в галузі автоматизації постійно зростає, адже технології стають складнішими, а ризики, пов'язані з некоректною експлуатацією обладнання, — вищими. Забезпечення нормативних умов мікроклімату, освітлення, захисту від шуму, вібрацій, випромінювання та електричної небезпеки є критично важливими.

Під час експлуатації автоматизованої системи контролю концентрації CO<sub>2</sub> в інкубаційній станції можливий вплив ряду небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Згідно з ГОСТ 12.0.003-74 та класифікацією чинних санітарно-гігієнічних норм, до основних потенційно небезпечних факторів належать:

1. **Хімічний фактор** — підвищена концентрація вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>). Перевищення гранично допустимої концентрації (ГДК) CO<sub>2</sub> може викликати головний біль, сонливість, зниження працездатності, а при значних перевищеннях — порушення дихання, втрату свідомості. Згідно з ДСанПіН 3.3.6.042-99, допустимий рівень CO<sub>2</sub> для робочих приміщень становить не більше 1000 ppm (0,1%), короткочасно — до 3000 ppm (0,3%).

2. **Фізичні фактори:**

○ **Електричний струм** — при порушенні ізоляції, коротких замиканнях або неправильному заземленні можливе ураження електричним струмом.

○ **Підвищений рівень шуму** — створюється вентиляторами, сервоприводами, системами повітрообміну. Згідно з ГОСТ 12.1.003-83 допустимий рівень шуму для постійного перебування персоналу не повинен перевищувати 80 дБ.

○ **Вібрації** — можуть передаватися від обладнання, яке обертається (вентилятори, сервомеханізми), через кріплення до елементів конструкції.

○ **Мікроклімат** — в інкубаційних станціях характерні підвищені температура та вологість, що створює додаткове навантаження на організм персоналу.

○ **Інфрачервоне та електромагнітне випромінювання** — генеруються окремими електронними модулями, особливо за високої інтенсивності живлення (12 В і вище).

3. **Психофізіологічні фактори** — пов'язані з монотонністю роботи, підвищеною відповідальністю та необхідністю регулярного візуального контролю параметрів на дисплеях.

Для мінімізації впливу вказаних факторів у системі передбачено: встановлення автоматичного контролю рівня CO<sub>2</sub> за допомогою сенсорів; екранування та заземлення всіх силових ланцюгів; встановлення шумоглушників і вибір обладнання з низьким рівнем звукового тиску; вентиляційні пристрої для регулювання мікроклімату.

## **5.1. Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту дослідження**

### **5.1.1. Технічні рішення з безпечної організації робочих місць**

Живлення силового обладнання інкубаторної станції та системи освітлення здійснюється від чотирипровідної трифазної мережі змінного струму напругою **380/220 В**. При цьому фазна напруга (фаза – “нуль”) становить **220 В**, а міжфазна (лінійна) — **380 В**. Робоча напруга мікропроцесорної частини системи (Arduino Leonardo R3) та сенсорів забезпечується через понижуючі блоки живлення на **5 В та 12 В** відповідно.

Згідно з ПУЕ, приміщення відноситься до категорії **без підвищеної небезпеки**, однак наявність вологості та джерел електричного струму зобов'язує дотримання додаткових засобів безпеки: виконання заземлення металевих частин устаткування, застосування автоматичних вимикачів із диференціальним захистом, ізольовані дроти з відповідним маркуванням.

#### **Робоче місце оператора**

Робоче місце призначене для роботи з персональним комп'ютером, обладнанням Arduino, сенсорами та виконавчими пристроями, розміщеними у шафі керування. Згідно з вимогами **ДСанПіН 3.3.2.007-98**, воно

комплектуються **одномісним робочим столом** з двома горизонтальними поверхнями:

- **Робоча поверхня:** 750 × 600 мм
- **Додаткова поверхня:** 750 × 350 мм

Обидві поверхні мають регулювання по висоті у межах **460–760 мм**, що дозволяє забезпечити ергономічне положення корпусу користувача при роботі.

Стіл закріплений до підлоги для уникнення вібрацій. Стілець дослідника має м'яку оббивку, регулювання висоти сидіння, спинки та нахилу, відповідає вимогам **ДСТУ ISO 9241-5:2007**.

### **Ергономіка розміщення**

Під час розміщення столу було дотримано такі вимоги: відстань до стіни з вікном — не менше **1 м**, до інших стін — **0,5 м**, відстань між бічними поверхнями моніторів — **не менше 1,2 м**.

Рекомендовані параметри положення екрана: відстань до очей користувача — **60–70 см**, напрям погляду — під кутом **20° вниз** від горизонталі, нахил екрана — від **-10° до +20°**, регулювання по висоті — в межах **±30 мм**.

Згідно з **ГОСТ 12.2.032-78**, екран монітора повинен мати контраст символів та фону з коефіцієнтом не менше **1:2** і не більше **1:15**.

Розміри знаків — **не менше 3 мм**, із оптимальним співвідношенням ширини до висоти **3:4** і відстанню між знаками **15–20% від їх висоти**.

### **5.1.2. Електробезпека**

Електробезпека – система організаційних і технічних заходів та засобів, що забезпечують захист людей від шкідливої і небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля і статичної електрики

Забезпечення електробезпеки є одним із найважливіших заходів охорони праці при проектуванні та експлуатації автоматизованої системи контролю CO<sub>2</sub>. Усі електротехнічні рішення реалізовано відповідно до вимог:

**ПУЕ (Правила улаштування електроустановок)[52];**

**НПАОП 0.00-1.28-10** — Правила охорони праці під час експлуатації електроустановок споживачів;

**ГОСТ 12.1.019-79** — ССБТ. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту.

### **Категорія приміщення**

Згідно з ПУЕ, приміщення відноситься до категорії **без підвищеної небезпеки**, проте наявність вологи та струмопровідних елементів передбачає виконання комплексу технічних заходів.

### **Робочі напруги системи:**

- Живлення основного обладнання — **220 В (однофазна мережа)**;
- Живлення мікроконтролерів і датчиків — **5 В та 12 В постійного струму** від понижувальних блоків живлення;
- Струм керування сервоприводами — **до 2 А**.

### **Технічні засоби електрозахисту:**

1. **Ізоляція провідників** — усі кабелі мають подвійну ізоляцію. Клас захисту оболонок — не нижче **IP40**.
2. **Автоматичне вимкнення живлення** — реалізовано за допомогою автоматичних вимикачів з УЗО (ПЗВ) номіналом 10 мА.
3. **Заземлення** — корпуси металевих конструкцій і шафи керування заземлені відповідно до ПУЕ, опір заземлювального пристрою не перевищує **4 Ом**.
4. **Маркування проводів** — живлення 220 В — **червоний/чорний**, керуючі сигнали — **жовтий**, заземлення — **зелено-жовтий**.
5. **Використання низьковольтного обладнання** — у місцях дотику передбачено використання схем з напругою не вище **12 В**.

### **Додаткові заходи:**

- монтаж силових кабелів у вогнестійких кабель-каналах;
- розміщення кнопки аварійного вимкнення у зоні досяжності оператора;
- щорічне проведення перевірки опору ізоляції та контуру заземлення.

## 5.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 5.2.1. Мікроклімат

До параметрів мікроклімату, що нормуються відносяться температура ( $t^{\circ}\text{C}$ ) і відносна вологість повітря ( $W$ , %), швидкість його переміщення ( $\text{м/с}$ ), потужність теплових випромінювань ( $\text{Вт/м}^2$ ). Нормується мікроклімат на робочому місці дослідника згідно ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

Обслуговування системи контролю  $\text{CO}_2$  відноситься до легкої категорії робіт, і ми розглядаємо теплий період року. Тоді допустимі параметри мікроклімату можуть бути такими (значення потрібно взяти з ДСН 3.3.6.042-99): температура повітря:  $22\text{-}24^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість повітря:  $40\text{-}60\%$ , швидкість руху повітря: не більше  $0,2$   $\text{м/с}$ , інтенсивність теплового випромінювання: не більше  $100$   $\text{Вт/м}^2$

Допустимі мікрокліматичні умови – поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину можуть викликати зміни теплового стану організму, що швидко минають і нормалізуються та супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції в межах фізіологічної адаптації. При цьому не виникає ушкоджень або порушень стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності. Допустимі величини мікрокліматичних умов встановлюються у випадках, коли на робочих місцях не можна забезпечити оптимальні величини мікроклімату за технологічними вимогами виробництва, технічною недосяжністю та економічно обґрунтованою недоцільністю.

Допустимі параметри мікроклімату наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Допустимі параметри мікроклімату

Період року	t, °C	W, %	V, м/с	Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>
Теплий	22 - 24	40 - 60	≤ 0,2	≤ 100 (умовне)
Холодний	21-25	Не більше 75	Не більше 0.1	≤ 100 (умовне)

Для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату в приміщенні інкубаторію передбачаються такі заходи:

**Вентиляція:** Забезпечення повітрообміну для видалення надлишків тепла, вологи та CO<sub>2</sub>. Розрахунок необхідної кратності повітрообміну здійснюється відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція і кондиціонування" [50].

**Кондиціонування:** Використання системи кондиціонування для підтримання температури повітря в межах 22-24 °C у теплий період року.

**Опалення:** Забезпечення системи опалення для підтримання температури повітря на належному рівні в холодний період.

**Теплоізоляція:** Забезпечення теплоізоляції приміщення та обладнання для зменшення теплових надходжень.

### 5.2.2. Склад повітря робочої зони

У повітрі робочої зони інкубаторію, крім вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), можуть бути присутні такі шкідливі речовини:

1. Пил. Пил може утворюватися з різних джерел, таких як корми для тварин, підстилка, шкірні покриви тварин, а також при проведенні

прибиральних робіт. Пил може викликати респіраторні захворювання, алергічні реакції та подразнення шкіри.

2. Аміак (NH<sub>3</sub>). Аміак утворюється внаслідок розкладання органічних речовин, зокрема відходів тварин. Він має різкий запах і може викликати подразнення очей, дихальних шляхів та шкіри.

3. Мікроорганізми. У повітрі інкубаторію можуть бути присутні бактерії, грибки та віруси, які можуть спричинити інфекційні захворювання.

4. Озон (O<sub>3</sub>). Озон може утворюватися при роботі деяких типів обладнання, наприклад, ультрафіолетових ламп, які використовуються для дезінфекції. Озон є сильним окисником і може викликати подразнення дихальних шляхів.

Вміст кожної шкідливої речовини в повітрі робочої зони нормується гранично допустимою концентрацією (табл. 5.2) (ГДК).

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Речовина	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Клас небезпеки
CO <sub>2</sub>	9000	4
Пил	6	4
Аміак	20	2
Озон	0,1	1

Заходи щодо забезпечення допустимого складу повітря:

Забезпечення надійної роботи системи контролю CO<sub>2</sub>.

1. Ефективна вентиляція (загальна та місцева).
2. Регулярне прибирання та дезінфекція.
3. Використання фільтрів для пилу.
4. Контроль джерел аміаку.
5. Обмеження виділення озону або ефективна вентиляція при його наявності.

## 6. Використання ЗІЗОД (за потреби).

### 5.2.3 Виробниче освітлення

Штучне освітлення поділяється на робоче, аварійне, охоронне та евакуаційне.

Робоче освітлення забезпечує необхідні умови для виконання виробничих процесів.

Аварійне освітлення передбачається для випадків виходу з ладу робочого освітлення.

Охоронне освітлення служить для забезпечення безпеки території підприємства вночі

Параметри освітлення нормуються відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 "Природне і штучне освітлення". Основними параметрами є:

Освітленість (Е, лк) - кількість світла, що падає на одиницю площі робочої поверхні.

Яскравість (L, кд/м<sup>2</sup>) - світлова характеристика поверхні, що випромінює світло.

Показник дискомфорту (Р) - характеристика дискомфортової блискості.

Коефіцієнт пульсації освітленості (%) - характеристика коливань освітленості в часі.

Вимоги до освітлення:

Вимоги до освітлення виробничих приміщень визначаються характером зорової роботи. Для робіт середньої точності потрібна освітленість на робочій поверхні не менше 200 лк. Для перевірки відповідності освітлення нормам виконується розрахунок освітленості.

Формула для розрахунку освітленості:

$$E = F / S \quad (5.1)$$

де:

Е – освітленість (лк)

F – світловий потік (лм)

$S$  – площа ( $m^2$ )

Приклад розрахунку:

Припустимо, світловий потік від світильників у приміщенні інкубаторію становить 6000 лм, а площа приміщення – 50  $m^2$ . Тоді:

$$E = 6000 \text{ лм} / 50 \text{ м}^2 = 120 \text{ лк}$$

Оскільки  $120 \text{ лк} < 200 \text{ лк}$  (норма для робіт середньої точності), необхідне підсилення освітлення.

Для забезпечення нормального освітлення в інкубаторії необхідно: використовувати світильники з достатнім світловим потоком, правильно розміщувати світильники для рівномірного розподілу світла, регулярно очищати світильники від пилу та забруднень, забезпечити можливість регулювання рівня освітленості (якщо потрібно), враховувати колірну температуру світла (для уникнення зорової втоми).

#### 5.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [51]. Допустимі рівні звукового тиску (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 - Допустимі рівні звукового тиску

Вид трудової діяльності, робоче місце	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц	Рівні шуму та еквівалентні рівні шуму, дБА, дБАекв.
Робота оператора системи контролю CO <sub>2</sub>	86 71 61 54 49 45 42 40 38	50

У виробничих приміщеннях джерелами шуму можуть бути: обладнання (наприклад, система вентиляції); технологічні процеси; транспортні засоби.

#### Нормування шуму

Параметри шуму нормуються відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.1.003:2020. Основними параметрами є: рівень звукового тиску (L, дБ); рівень звуку, дБА. Гранично допустимі рівні звуку на робочих місцях не повинні перевищувати 80 дБА.

#### Вплив шуму на людину

Шум може викликати: Погіршення слуху; нервові розлади; підвищення стомлюваності; зниження продуктивності праці.

Для зниження рівня шуму на робочих місцях необхідно: застосовувати малошумне обладнання; встановлювати звукоізолюючі кожухи та екрани; використовувати засоби індивідуального захисту органів слуху (ЗІЗ); проводити організаційні заходи (наприклад, чергування, дистанційна робота).

### **5.2.5 Виробничі вібрації**

Вібрація – це коливальний рух твердого тіла.

Виробнича вібрація – це коливання, що передаються тілу людини від працюючих машин і обладнання.

Залежно від способу передачі на тіло людини, вібрації поділяються на: загальні та локальні.

Загальна вібрація передається через опорні поверхні на тіло працівника.

Локальна вібрація передається через руки працівника.

В інкубаторії джерелами вібрації можуть бути: вентиляційне обладнання; насоси; інше технологічне обладнання.

Вібрації нормуються відповідно до ДСТУ ГОСТ 12.1.012-2008.

Основними параметрами є: віброшвидкість та віброприскорення.

Гранично допустимі рівні вібрації залежать від її частоти та тривалості впливу.

Вплив вібрації на людину

Вібрація може викликати: вібраційну хворобу; порушення нервової системи; захворювання опорно-рухового апарату.

Заходи щодо зниження рівня вібрації: застосування віброізолюючих матеріалів; використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ); технологічні заходи; організаційні заходи (режими праці та відпочинку).

### **5.2.6 Виробничі випромінювання**

Виробничі випромінювання – це електромагнітні та корпускулярні випромінювання, що виникають у виробничих умовах і можуть негативно впливати на працівників.

У виробничих умовах можуть мати місце такі види випромінювань:

Електромагнітні випромінювання: радіочастотні випромінювання; інфрачервоне випромінювання; ультрафіолетове випромінювання; лазерне випромінювання; рентгенівське випромінювання; гамма-випромінювання.

Корпускулярні випромінювання: альфа-випромінювання; бета-випромінювання; нейтронне випромінювання.

В інкубаторії джерела випромінювань можуть бути: обладнання (наприклад, ультрафіолетові лампи для дезінфекції); електрообладнання; комп'ютери та інша офісна техніка.

Параметри випромінювань нормуються відповідними нормативними документами, такими як ДСТУ, ДСН, ГОСТ.

Випромінювання можуть викликати різні негативні наслідки для здоров'я, залежно від виду, інтенсивності та тривалості впливу, включаючи: пошкодження шкіри та очей; розвиток катаракти; променеви хворобу; онкологічні захворювання.

Для захисту від випромінювань необхідно: застосовувати захисне обладнання та екрани; обмежувати час перебування в зоні випромінювання; використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ); проводити моніторинг рівнів випромінювань.

### 5.3 Технічні рішення з пожежної безпеки

Пожежна безпека є критично важливим аспектом при проектуванні та експлуатації будь-якого об'єкта, включаючи інкубаторій. Цей розділ розроблено відповідно до вимог Закону України "Про пожежну безпеку" та НАПБ А.01.001-14 "Правила пожежної безпеки в Україні"

Для коректного розуміння та застосування вимог пожежної безпеки, наведемо основні терміни та визначення згідно з ДСТУ 2272:2006 "Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять":

Горіння – екзотермічний процес, що охоплює окисновідновні перетворення речовин і (або) матеріалів і характеризується наявністю летких продуктів і (або) світлового випромінювання. Ознаками горіння є теплове, світлове, ультрафіолетове випромінювання, дим, зміна складу газового середовища та підвищення температури.

Пожежа – неконтрольований процес горіння, що супроводжується знищенням або пошкодженням матеріальних цінностей і створює небезпеку для людей.

Первинні засоби пожежогасіння – засоби, призначені для локалізації та ліквідації пожежі на початковій стадії (вогнегасники, пожежні кран-комплекти, пожежний інвентар).

Вогнестійкість будівельних конструкцій є здатність зберігати свої несучі функції під час пожежі. Вимоги до вогнестійкості визначаються ДБН В.1.1.7-2016 "Пожежна безпека. Будівельні конструкції. Вимоги пожежної безпеки" [Додаток Н, П].

Ступінь вогнестійкості будівлі визначається мінімальними межами вогнестійкості її будівельних конструкцій. Межа поширення вогню – це час, протягом якого конструкція перешкоджає поширенню вогню (табл.5.4)

Таблиця 5.4 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій

Елемент конструкції	Мінімальна межа вогнестійкості, хв	Максимальна межа поширення вогню, м
Несучі стіни	90	0
Перекриття	60	0
Колони	90	0

Протипожежні перешкоди (стіни, перекриття, двері, ворота) призначені для запобігання поширенню пожежі між приміщеннями (табл.5.5). Вимоги до них встановлюються ДБН В.1.1-7:2016.

Таблиця 5.5 – Мінімальні межі вогнестійкості протипожежних перешкод

Тип протипожежної перешкоди	Мінімальна межа вогнестійкості, хв
Протипожежна стіна	150
Протипожежне перекриття	60
Протипожежні двері	30

Система евакуації повинна забезпечувати безпечний вихід людей з будівлі у разі пожежі.

Шляхи евакуації повинні бути вільними від перешкод, мати достатню ширину та висоту. Евакуаційні виходи повинні бути розташовані таким чином, щоб забезпечити швидкий вихід з будь-якої точки приміщення. Система оповіщення про пожежу повинна забезпечувати своєчасне сповіщення людей про небезпеку.

Для захисту інкубаторію від пожежі передбачаються такі системи:

Автоматична пожежна сигналізація – для своєчасного виявлення пожежі.

Система оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей – для організації безпечної евакуації.

Система автоматичного пожежогасіння (за потреби) – для ліквідації пожежі на початковій стадії. Внутрішній протипожежний водопровід – для забезпечення подачі води до місця пожежі.

Первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники) – для локалізації невеликих пожеж. Вибір (табл.5.6) вогнегасників здійснюється згідно з Правилами експлуатації та типовими нормами належності вогнегасників (Наказ МВС України № 25 від 15 січня 2018 року та Зміни до Правил № 765 від 28 жовтня 2020 року).

Таблиця 5.6 – Необхідна кількість вогнегасників

Тип приміщення	Площа, м <sup>2</sup>	Необхідна кількість вогнегасників	Тип вогнегасника
Виробничий цех	20 0	4	ВП-5
Адміністративне	50	2	ВВК-2

Інші заходи пожежної безпеки: забезпечення наявності планів евакуації, проведення інструктажів з пожежної безпеки для персоналу, регулярні перевірки систем протипожежного захисту.

### **Висновки:**

У межах даного розділу було здійснено комплексний аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів, що супроводжують впровадження та експлуатацію автоматизованої системи контролю рівня CO<sub>2</sub> в умовах інкубаційної станції. З урахуванням особливостей технологічного процесу та

характеру обладнання ідентифіковано ключові ризики для здоров'я та безпеки персоналу.

До основних небезпек віднесено: можливість ураження електричним струмом, негативний вплив підвищеного рівня шуму та вібрацій, недостатній рівень освітлення, перевищення допустимих концентрацій CO<sub>2</sub> у повітрі, а також ймовірність виникнення пожежонебезпечних ситуацій через електричне обладнання.

На основі виявлених ризиків розроблено низку технічних і організаційних заходів, які відповідають вимогам ПУЕ, ДБН, ДСанПіН, ГОСТ та НПАОП. Зокрема:

Вжито заходів з електробезпеки, що передбачають застосування пристроїв захисного відключення, заземлення корпусів, використання ізольованих проводів та блоків живлення з низькою напругою;

Розраховано оптимальні параметри штучного освітлення відповідно до нормативів, із вибором джерел світла, які забезпечують достатню яскравість і мінімальне навантаження на зір;

Запропоновано заходи пожежної безпеки, включаючи встановлення вогнегасників, АПС, використання негорючих матеріалів та інструкцій з евакуації;

Розроблено рекомендації з ергономіки робочого місця: висота столу й монітора, розташування клавіатури, оптимальна відстань до екрана, організація простору згідно з нормами.

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було розроблено, обґрунтовано та частково реалізовано проєкт автоматизованої системи контролю концентрації вуглекислого газу для інкубаційних станцій, що дозволяє підвищити ефективність інкубаційного процесу, забезпечити стабільність мікрокліматичних параметрів та зменшити залежність від людського фактору.

У процесі дослідження:

- обґрунтовано актуальність контролю CO<sub>2</sub> в інкубаційних установках;
- проаналізовано сучасні технічні рішення, що використовуються у системах регулювання мікроклімату;
- здійснено вибір оптимального мікроконтролера (ATmega32u4, плата Arduino Leonardo) та виконавчих пристроїв (сервоприводи), що забезпечують точне й стабільне керування вентиляційними механізмами;
- розроблено алгоритм автоматичного реагування на зміну концентрації CO<sub>2</sub>, схему підключення та принцип роботи системи;
- реалізовано математичну модель залежності між вихідною напругою сенсора та концентрацією CO<sub>2</sub> в повітрі;
- проведено економічне обґрунтування впровадження, яке підтвердило рентабельність системи порівняно з промисловими аналогами;
- розроблено комплекс заходів з охорони праці, спрямованих на забезпечення безпеки під час експлуатації автоматизованої системи.

Результати роботи свідчать про доцільність впровадження автоматизованої системи контролю CO<sub>2</sub> в інкубаційних станціях. Запропоноване рішення є економічно доступним, технологічно ефективним та може бути адаптоване для потреб як малих, так і промислових господарств.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Газові сенсори та застосування наноматеріалів у сенсоричі : навч. посіб. / Л. П. Олексенко, Н. П. Максимович, І. П. Матушко, Г. П. Федоренко. – К. : ВПЦ "Київський університет", 2019. – 143с
2. Фізичні основи електронної техніки: Підручник/ З.Ю та ін. - Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2004. - 880 с,
3. Фізичні основи сенсорики: Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. М. Коваль, 2021. – 130 с
4. Yunusa, Zainab & Hamidon, Mohd Nizar & Kaiser, Ahsanul & Awang, Z.. (2014). Gas Sensors: A Review. Sensors and Transducers. 168. 61-75.
5. Infrared Technology for Fail-To-Safe Hydrocarbon Gas Detection / Шанкар Баліга [Електронний ресурс]  
<http://s7d9.scene7.com/is/content/minesafetyappliances/IR%20Gas%20Detection%20T echnology%20White%20Paper>
6. Gas sensors, A Review / Chengxiang Wang, Longwei Yin, Luyuan Zhang, Dong Xiang, Rui Gao, Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials, 2014. – 3-12 p. – ISSN 1424-8220
7. Shafiei, Mahnaz. (2023). Investigation of Nanostructured Thin Film Based Schottky Diodes for Gas Sensing Applications.
8. How infrared gas detectors work. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.enggcyclopedia.com/2011/11/infrared-gas-detectors/>
9. J. Chang, G. Zhou, E.R. Christensen, R. Heideman, J. Chen Graphene-based sensors for detection of heavy metals in water: a review Anal. Bioanal. Chem., 406 (2014), pp. 3957-3975
10. Deng, Xianghua & Tang, Hao & Jiang, Jianhui. (2014). Recent progress in graphene-material-based optical sensors. Analytical and bioanalytical chemistry. 406. 10.1007/s00216-014-7895-4.

11. Lin YM, Avouris P Strong suppression of electrical noise in bilayer graphene nanodevices. *Nano Lett* (2008) 8 2119–2125
12. Marchenko D, Varykhalov A, Rybkin A, Shikin AM, Rader O Atmospheric stability and doping protection of noble-metal intercalated graphene on Ni(111). (2011) *Appl Phys Lett* 98:122111
13. Berger C, Song Z, Li T, Li X, Ogbazghi AY, Feng R, Dai Z, Marchenkov AN, Conrad EH, First PN, de Heer WA Ultrathin epitaxial graphite: 2D electron gas properties and a route toward graphene-based nanoelectronics. *J Phys Chem B* 108:19912–19916
14. Singh V, Joung D, Zhai L, Das S, Khondaker SI, Seal S Graphene based materials: past, present and future. *Prog Mater Sci* (2011) 56 1178–1271.
15. Akbari, Elnaz & Yusof, Rubiyah & Ahmadi, Mohammad & Enzevae, Aria & Kiani, Mehran & Karimi, Hediye & Rahmani, Meisam. (2014). Bilayer Graphene Application on NO<sub>2</sub> Sensor Modelling. *Journal of Nanomaterials*. 2014. 10.1155/2014/534105.
16. Вуглекислий газ та його вплив на живі організми. Режим доступу до ресурсу: [http://ecounit.com.ua/artikle\\_101.html](http://ecounit.com.ua/artikle_101.html)
17. Вимірювач CO<sub>2</sub> з даталогером. Режим доступу до ресурсу: <https://mysku.ru/blog/aliexpress/25137.html>
18. Прилад для вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> UNI-T A37. Режим доступу до ресурсу: <https://mysku.ru/blog/china-stores/74329.html>
19. Вимірювач рівня CO<sub>2</sub> TFA AirCO<sub>2</sub>ntrol Mini. Режим доступу до ресурсу: [https://bt.rozetka.com.ua/tfa\\_airco2ntrol\\_mini\\_31500602/p8185012/characteristics/6060](https://bt.rozetka.com.ua/tfa_airco2ntrol_mini_31500602/p8185012/characteristics/6060)
20. Термоелектричні інфрачервоні датчики на основі MEMS. Режим доступу до ресурсу: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11465-017-0441-2.pdf>
21. Теоретичні основи та використання NDIR. Режим доступу до ресурсу:

[https://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/TechnicalNote-169\\_Theory-And-Operation-Of-NDIR-Sensors\\_04-02\\_RU.pdf](https://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/TechnicalNote-169_Theory-And-Operation-Of-NDIR-Sensors_04-02_RU.pdf)

22. Недисперсійний інфрачервоний аналізатор. Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki>

23. Система NDIR на основі MEMS для моніторингу вуглекислого газу. Режим доступу до ресурсу: <https://www.researchgate.net/publication/>

24. Інфрачервоні світлодіодні елементи для зондування газу NDIR. Режим доступу до ресурсу: <https://www.akm.com/kr/ko/products/gassensing/infrared-led-element-for-ndir-gas-sensor/>

25. Оптичні фільтри відкривають нові можливості. Режим доступу до ресурсу: <https://www.photonics.com/Unavailable.html?aspxerrorpath=/a56392>

26. ІЧ-детектори. Режим доступу до ресурсу: <https://www.lasercomponents.com/de-en/ir-components/ir-detectors/>

27. Інфрачервоні детектори. Режим доступу до ресурсу: [https://www.rpphotonics.com/infrared\\_detectors.html](https://www.rpphotonics.com/infrared_detectors.html)

28. J. Fonollosa, B. Halford, L. Fonseca, J. Santander, S. Udina, M. Moreno, J. Hildenbrand, J. Wöllenstein, S. Marco, Ethylene optical spectrometer for apple ripening monitoring in controlled atmosphere store-houses, *Sensor. Actuat. B* 136(2009) 546–554.

29. L. Fonseca, E. Cabruja, C. Calaza, R. Rubio, J. Santander, E. Figueras, I. Gràcia, C. Cané, M. Moreno, S. Marco, Feasibility of a flip-chip approach to integrate an IR filter and an IR detector in a future gas detection cell, *Microsyst. Technol.* 10 (2004) 382-386.

30. В. В. Кухарчук, А. М. Коваль. Методи та засоби перетворення інформації: електронний лабораторний практикум комбінованого (локального та мережевого) використання [Електронний ресурс.- Вінниця : ВНТУ, 2023. – 176с. (7.5 авт.арк/3.75 авт.арк).

31. В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т. Володарський, В.В. Грабко. Основи метрології та електричних вимірювань : Підручник: – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. – 538 с.

32. В.В. Кухарчук. Основи метрології та електричних вимірювань / Конспект лекцій. Частина I: Навчальний посібник: Вінниця: ВНТУ, 2018. 148с.
33. Орнатський П. П. Вступ до методології науки про вимірювання. – К.: ІСДО, 1994. – 246 с.
34. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник: у 2 т./ За ред.Б.Стадника. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2005. – т. 1. Основи метрології. – 532 с.
35. Основи метрології та вимірювальної техніки: підручник: у 2 т. / За ред. Б.Стадника. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2005. – т. 2. Вимірювальна техніка. – 656 с.
36. Орнатський П. П. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки. – К.: Вища школа, 1983. 455с.
37. Орнатський П. П. Автоматичні вимірювання і прилади. – К.: Вища школа, 1980. -458 с.
38. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань / Конспект лекцій. Частина II: Вінниця, 2020. -150с.
39. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: підручник / В.П. Бабак, С.В. Бабак, С.В. Єременко та ін.: За ред. чл. –кор. НАН України В.П.Бабака / К.: 2014. – 832с.
40. Основи теорії інформації та кодування: підручник / [І.В. Кузьмін, В.І. Троцишин, А.І. Кузьмін, В.О. Кедрус, В.Р. Любчик]; за ред. І.В. Кузьміна. – 3-тє вид. перероб. та допов. – Хмельницький: ХНУ, 2009. – 393 с.
- 2025.
41. Arduino Leonardo A000057 Arduino Leonardo A000057. – Arduino.ua [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/ru/prod260-arduino-leonardo-a000057> – Дата звернення: квітень 2025.
42. Сервопривід MG996R-180° Сервопривід MG996R-180°. – Arduino.ua [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/ru/prod272-servoprivod-mg996r-180> – Дата звернення: квітень 2025.

43. Датчик CO<sub>2</sub> MH-Z19B Датчик вуглекислого газу CO<sub>2</sub> MH-Z19B. – Mini-Tech [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-co2> – Дата звернення: квітень 2025.

44. Корпус для Arduino Leonardo (прозорий) Корпус для Arduino Uno, UNO SMD, Arduino Leonardo (прозорий). – RadioStore [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiostore.com.ua/p893692318-korpus-dlya-arduino.html> – Дата звернення: квітень 2025.

45. Блок живлення Full Energy BGM-123Lite 12В 3А – ELVIS.COM.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.elvis.com.ua/en/product/full-energy-bgm-123lite-blok-pitaniya-12v-3a-en.html> – Дата звернення: квітень 2025.

46. Понижуючий модуль 5В – FlyMod [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://flymod.net/en/item/dc\\_step\\_down\\_module\\_5v](https://flymod.net/en/item/dc_step_down_module_5v) – Дата звернення: квітень 2025.

47. Плата прототипування – Тему [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.temu.com/ua-en/5pcs-set-double-sided-pcb-board-prototype-kit-soldering-6-sizes--printed-circuit-board-for-diy-and-electronic-project-solderable-circuit-protoboards-for-diy-motor-car-robot-soldering-electronic-projects-pcb-2x8-3x7-4x6-5x7-6x8-7x9cm-g-601099534359666.html> – Дата звернення: квітень 2025.

48. Корпус для Arduino Leonardo – SB Components [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://shop.sb-components.co.uk/products/premium-transparent-case-for-arduino-leonardo-rohs-compliant> – Дата звернення: квітень 2025.

49. Витратні матеріали (дроти, з'єднувачі) – Prom.ua [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/p123456789-nabir-drotiv-dlya-arduino.html> – Дата звернення: квітень 2025.

50. ДСТУ Б В.2.6-148:2010. Конструкції будівель. Настанова з проектування конструкцій із легких сталевих тонкостінних елементів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://e-construction.gov.ua/files/upload/87f62af0-301b-11ec-a334-f3107eb85cf5.pdf>

51. ДСТУ Б В.2.6-148:2010. Конструкції будівель. Настанова з проектування конструкцій із легких сталевих тонкостінних елементів. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://dbn.co.ua/publ/posilannja\\_dstu\\_b\\_v\\_2\\_6\\_148/3-1-0-315](https://dbn.co.ua/publ/posilannja_dstu_b_v_2_6_148/3-1-0-315)

52. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): Затв. наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sies.gov.ua/storage/app/sites/4/uploadedfiles/Законадство.%20Накази%20Міненерго/Nakaz%20476%20vid%2021.07.2017/stranitsy-iz-pue-skan1.pdf>

53. Кучанський В. С. Кухарчук В.В. Математична модель вимірювального перетворення вуглекислого газу інфрачервоними сенсорами генераторного типу // The 7th International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations”. Osaka, Japan: CPN Publishing Group, 2025. – С. 108–116. – ISBN 978-4-9783419-4-5.

54. Кучанський В. С. Кухарчук В.В. Адаптивний алгоритм підвищення точності інфрачервоних сенсорів концентрації вуглекислого газу // LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки ВНТУ, Вінниця, 2025. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2025/paper/view/23782>

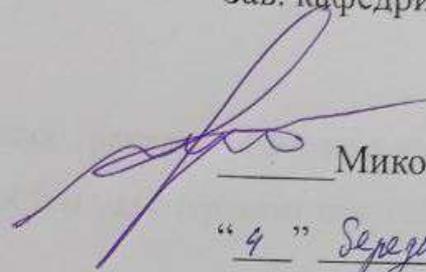
Додаток А

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

  
\_\_\_\_\_ Микола МОШНОРІЗ  
« 4 » Серезня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

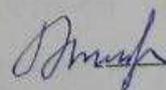
на магістерську кваліфікаційну роботу

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ  
ВМІСТОМ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В ІНКУБАТОРНИХ СТАНЦІЯХ**

08-24.МКР.001.00.000 ТЗ

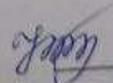
Керівник роботи

д.т.н. професор каф. КЕМСК

 Василь КУХАРЧУК

« 4 » Серезня 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-23мз

 Владислав КУЧАНСЬКИЙ

« 4 » Серезня 2025 р.

## **1. Загальні відомості**

**Повне найменування розробки:** «система автоматизованого контролю та керування вмістом вуглекислого газу в інкубаторних станціях».

**Скорочене найменування розробки:** «Система автоматизованого контролю CO<sub>2</sub> в інкубаторах».

**Замовник:** Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

## **2. Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

## **3. Призначення розробки і галузь використання**

Розробка призначена для автоматичного моніторингу концентрації вуглекислого газу в інкубаційних установках з метою покращення умов інкубації, зниження втрат ембріонів та підвищення якості виводу пташенят. Система може застосовуватися в промислових птахівничих комплексах, інкубаторних станціях, науково-дослідних установах, а також у фермерських господарствах.

## **4. Вимоги до розробки**

Система повинна забезпечувати: точне вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> у межах 0–10 000 ppm; автономну роботу без постійного втручання оператора; автоматичне керування вентиляційним пристроєм при перевищенні порогових значень; контроль по 8 незалежних каналах (зонам інкубації); вивід інформації про стан на дисплей або у хмарне середовище (опціонально).

## **5. Комплектація розробки**

Система включає: мікроконтролер Arduino Leonardo R3 (ATmega32u4); 8 сенсорів CO<sub>2</sub> типу NDIR); 8 сервоприводів (керування вентиляцією); блок живлення 5 В і 12 В; сигнальні лінії та корпус системи; плата з підключенням та захистом (макетна або друкована плата).

## 6. Джерела розробки

1. Datasheet EE872 CO<sub>2</sub> Sensor (E+E Elektronik, 2024).
2. Arduino Leonardo R3. Technical reference manual.
3. ПУЕ, ДБН В.2.5-28:2018, ДСанПіН 3.3.6.042-99.
4. Методичні матеріали кафедри КЕМСК.
5. Власні експериментальні дані.

## 7. Технічні характеристики

Кількість зон контролю: 8; Діапазон вимірювання CO<sub>2</sub>: 0–10 000 ppm;  
;Точність:  $\pm(50 \text{ ppm} + 3\% \text{ від значення})$ ; Напряга живлення: 5 В/12 В пост. струму;  
Тип приводу: сервопривід 5 В, аналогове керування (PWM) ; Споживана потужність:  
до 20 Вт; Робоча температура: 0–50 °С; Вихід: аналоговий або цифровий сигнал +  
сигнал керування

## 8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

## 9. Елементна база

Arduino Leonardo R3, сенсори NDIR, сервоприводи SG90/12В, блок живлення Mean Well, провідники УТР/мідні, макетна плата або друкована плата українського виробництва.

## 10. Конструктивне виконання

Система монтується в герметичному пластиковому корпусі з вентиляційними

отворами, захищена від пилу і вологи (IP54), допускає монтаж на DIN-рейку або настінну установку.

### **11. Показники технологічності**

Конструкція є модульною та легко адаптується до різних типів інкубаторів. Система може бути реалізована як на макетній платі, так і у вигляді друкованої плати з можливістю серійного виробництва.

### **12. Технічне обслуговування і ремонт**

Обслуговування здійснюється технічним персоналом середньої кваліфікації. Періодична перевірка датчиків CO<sub>2</sub> — кожні 3 місяці. Калібрування сенсорів виконується згідно з технічним регламентом виробника. У разі несправності передбачено заміну модулів.

### **13. Живлення системи**

Живлення системи здійснюється від мережі змінного струму 220 В через понижувальний імпульсний блок живлення на 5 В і 12 В постійного струму.

### **14. Порядок контролю та прийняття**

Контроль виконання розрахункової та графічної частини здійснюється керівником згідно з графіком. Прийняття системи до захисту здійснюється комісією кафедри згідно з внутрішнім розкладом ВНТУ.

**Додаток Б**  
**(обов'язковий)**

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

**ПІДПИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СЕНСОРІВ NDIR ТА  
РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВМІСТОМ  
ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ**



## ДОДАТОК Д

## Результати моделювання функції перетворення сенсора концентрації вуглекислого газу

## Теоретичні статичні характеристики сенсора вуглекислого газу :

> Закон БУГЕРА :

>  $\Phi := F \cdot e^{+k \cdot P}$ ;

$$\Phi := F e^{k P}$$

> Струм на виході фотодіода :

>  $i := S \cdot \Phi$ ;

$$i := S F e^{k P}$$

> Напруга на виході шунта :

>  $u := i \cdot R$ ;

$$u := S F e^{k P} R$$

> Напруга на виході вимірювального підсилювача :

>  $U := K \cdot u$ ;

$$U := K S F e^{k P} R$$

> Чутливість сенсора :

>  $s := \frac{d}{d P} U$ ;

$$s := K S F k e^{k P} R$$

> РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ:

>  $S := 0.498$ ;

$$S := 0.498$$

>  $F := 0.00725$ ;

$$F := 0.00725$$

>  $k := 0.000285$ ;

$$k := 0.000285$$

>  $R := 1.4$ ;

$$R := 1.4$$

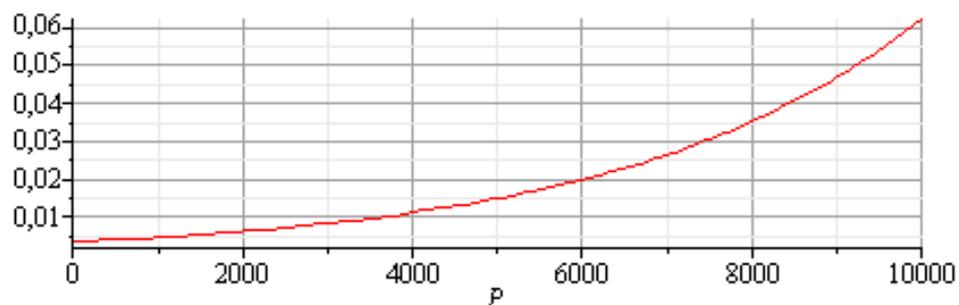
>  $K := 125$ ;

$$K := 125$$

>  $i := S \cdot F \cdot e^{+k \cdot P}$ ;

$$i := 0.00361050 e^{0.000285 P}$$

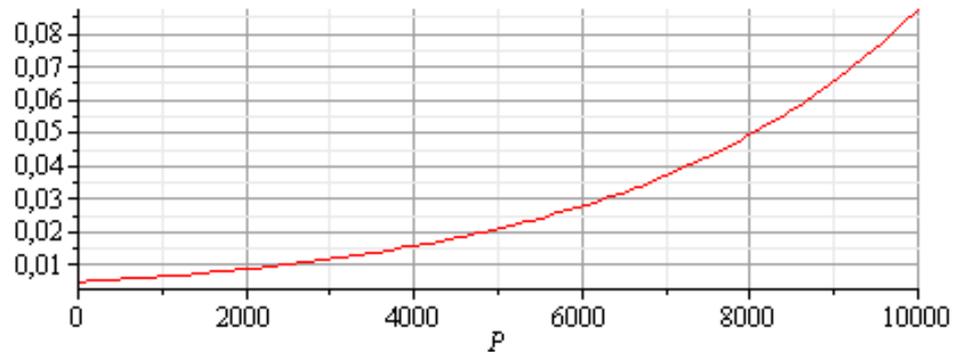
> plot(i, P = 0 .. 10000);



>  $u := i \cdot R;$

$$u := 0.005054700e^{0.000285 P}$$

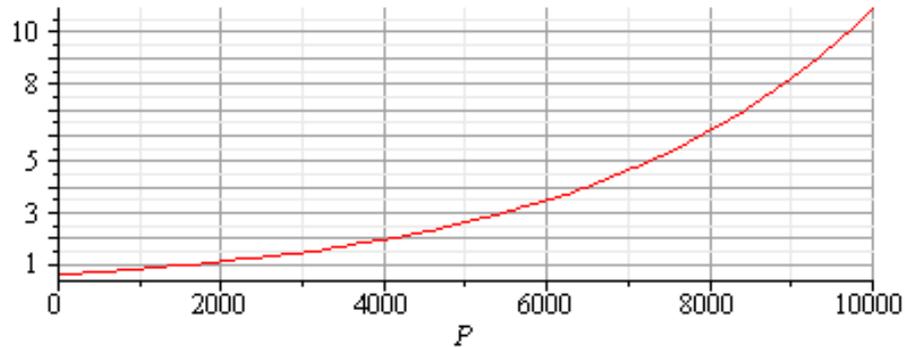
> plot(u, P = 0 ..10000)



>  $U := K \cdot u;$

$$U := 0.631837500e^{0.000285 P}$$

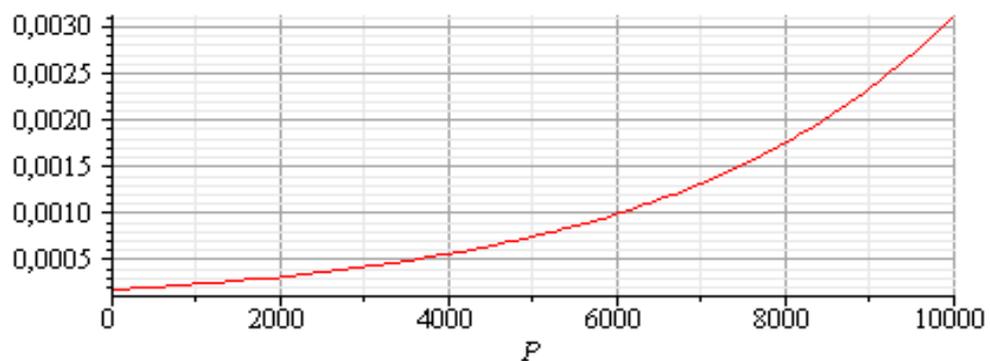
> plot(U, P = 0 ..10000);



>  $s := K S F k e^{kP} R;$

$$s := 0.0001800736875e^{0.000285 P}$$

> plot(s, P = 0 ..10000);



### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙНОЇ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ:

>  $S := 0.075;$

$$S := 0.075$$

>  $F := 0.00125;$

$$F := 0.00125$$

> k := 0.0025;

*k := 0.0025*

> R := 10;

*R := 10*

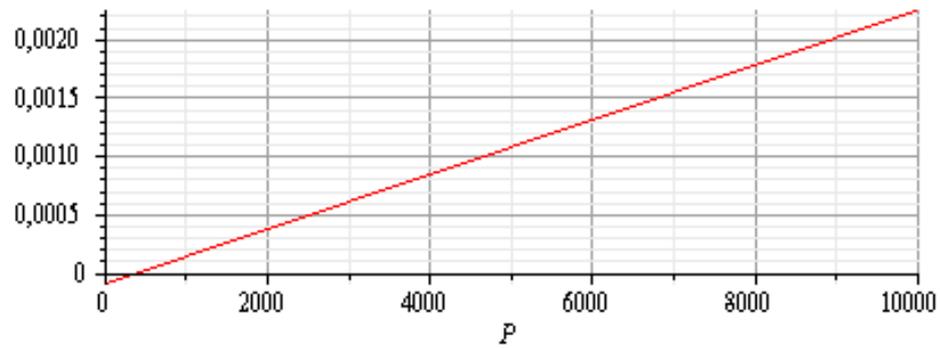
> K := 250;

*K := 250*

> i := -S·F·(1-k·P);

*i := -S F (1 - k P)*

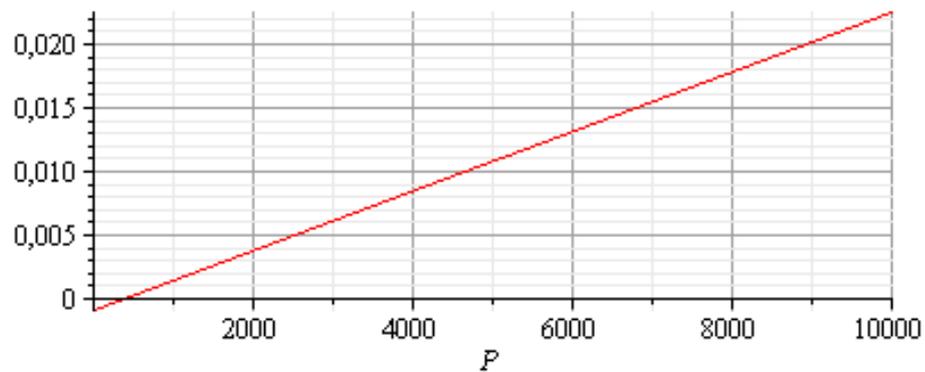
> plot(i, P = 0 .. 10000);



> u := i·R;

*u := -S F (1 - k P) R*

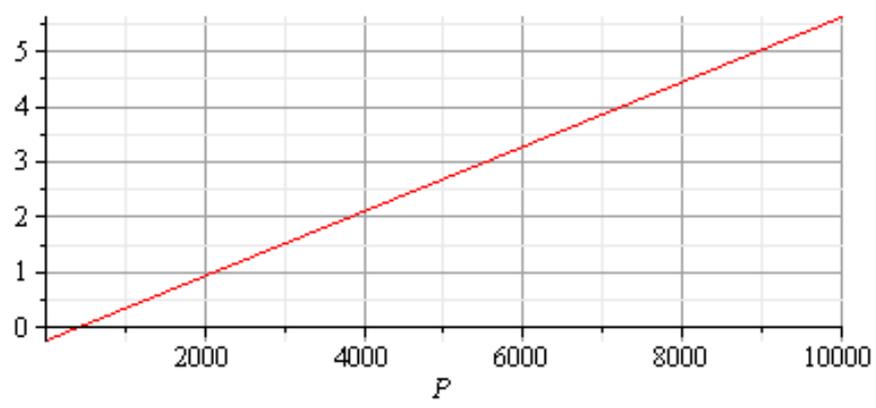
> plot(u, P = 0 .. 10000)



> U := K·u;

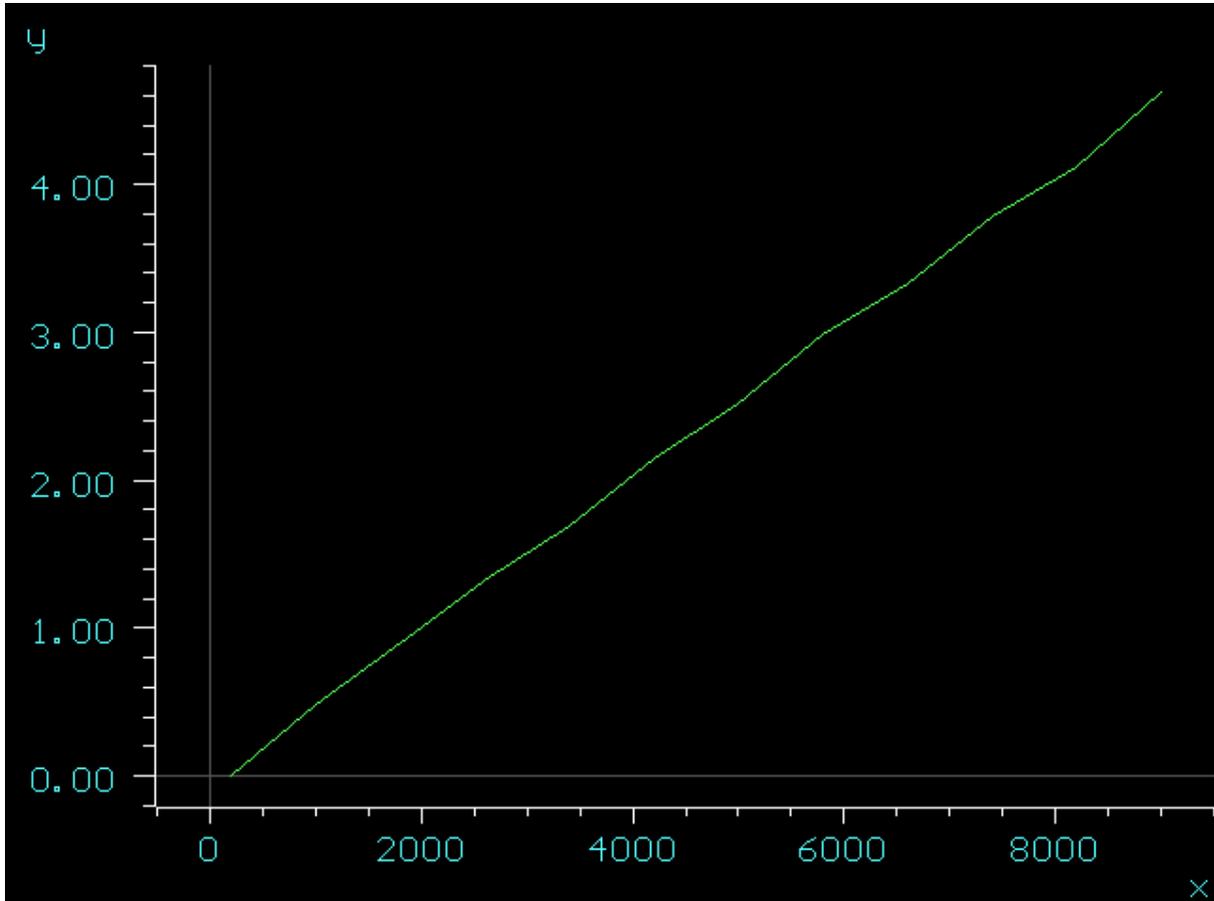
*U := -K S F (1 - k P) R*

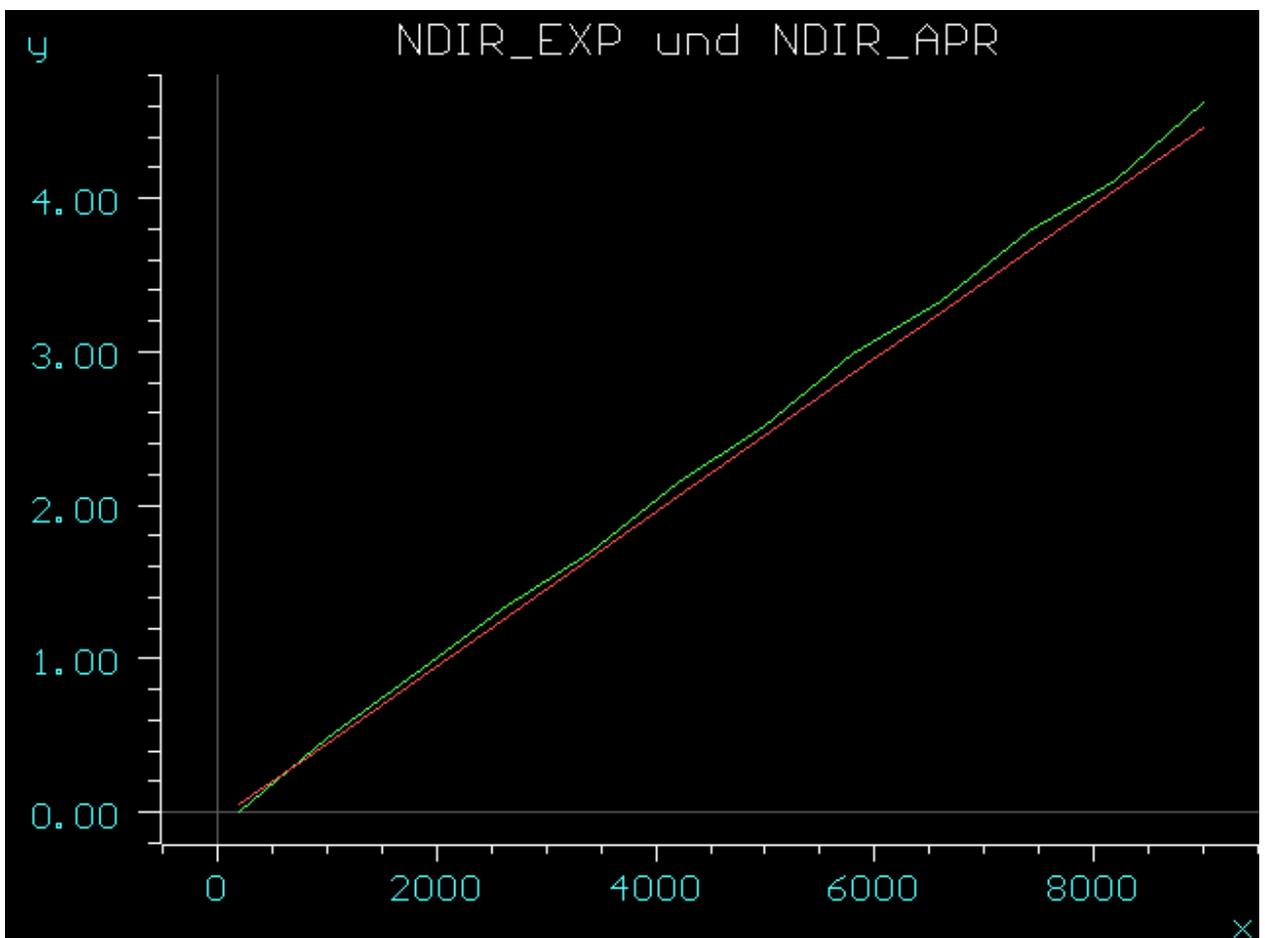
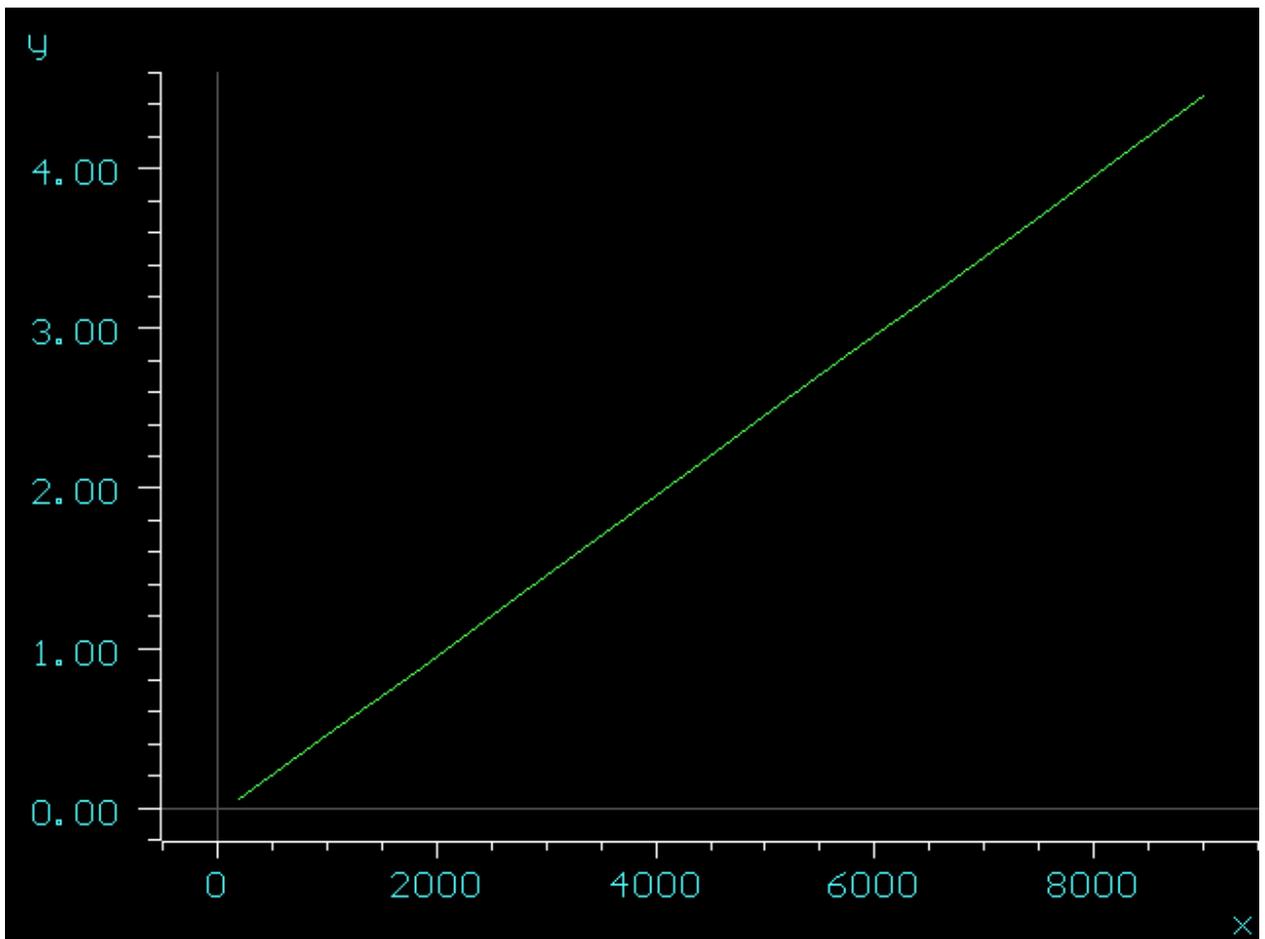
> plot(U, P = 0 .. 10000)

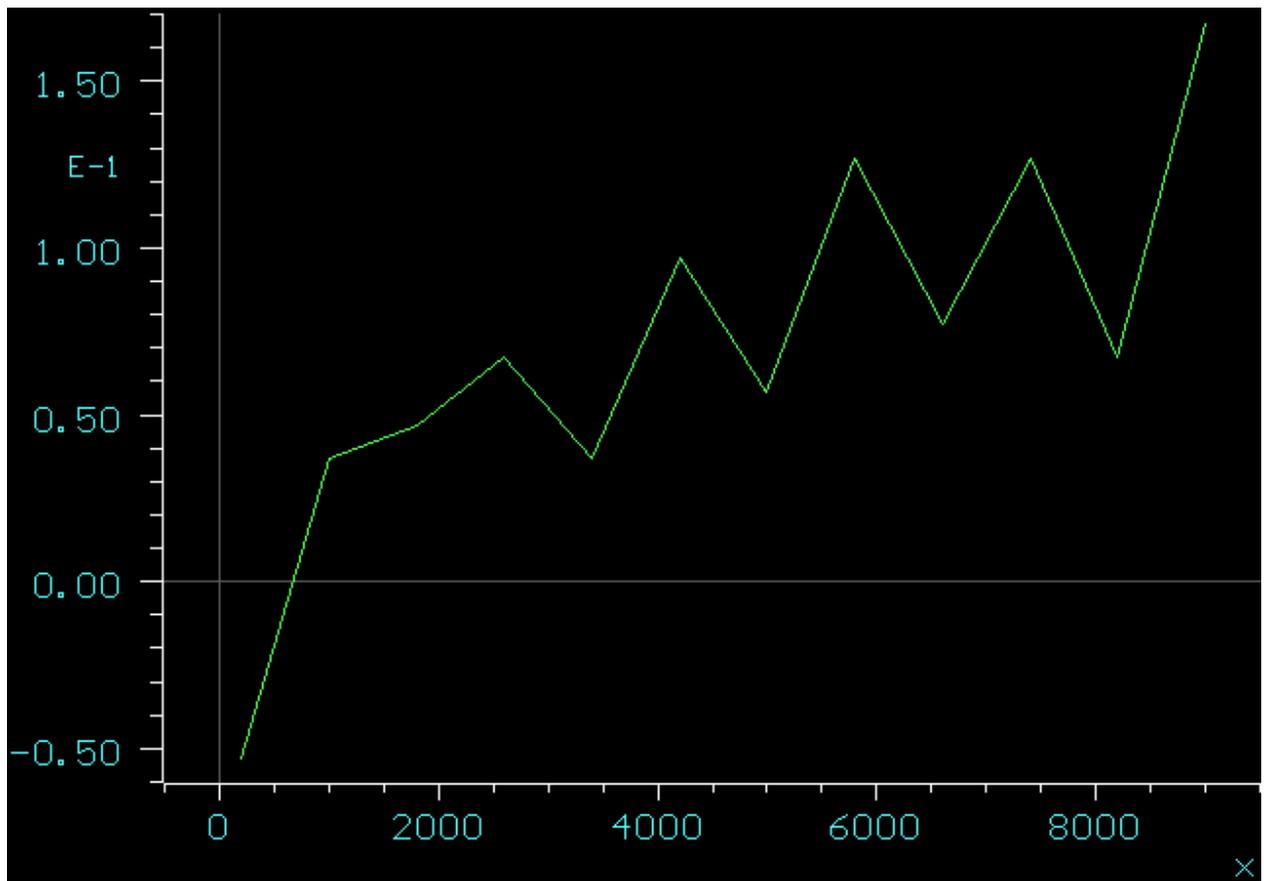


## ДОДАТОК Е

Результати моделювання експериментальної статичної характеристики сенсора  
NDIR





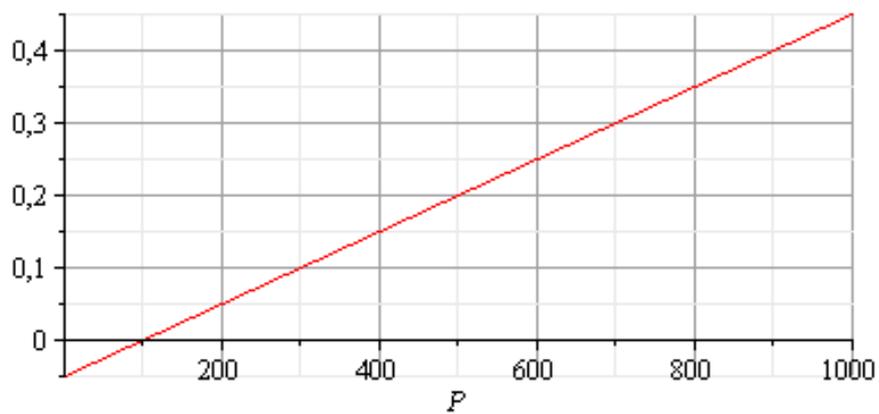


> Емпірична функція перетворення :

>  $U_1 := -0.05 + 0.0005 \cdot P$ ;

$$U_1 := -0.05 + 0.0005 P$$

> `plot(U1, P = 0 .. 1000);`

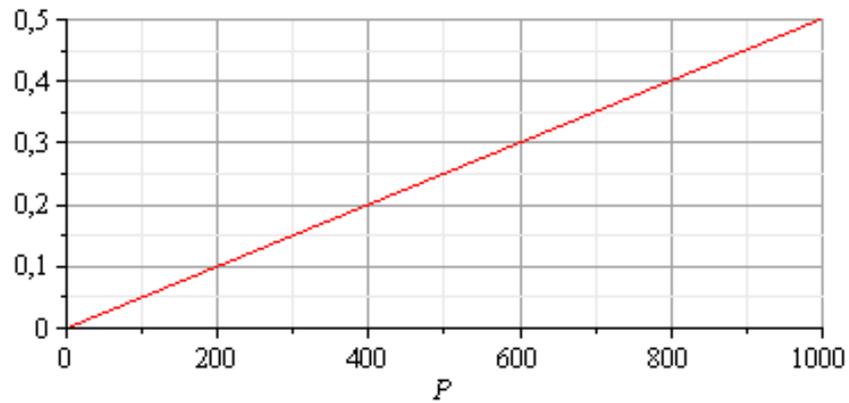


> З введенням поправки на адитивну складову :

>  $U_2 := (-0.05 + 0.05) + (0.0005 \cdot P)$ ;

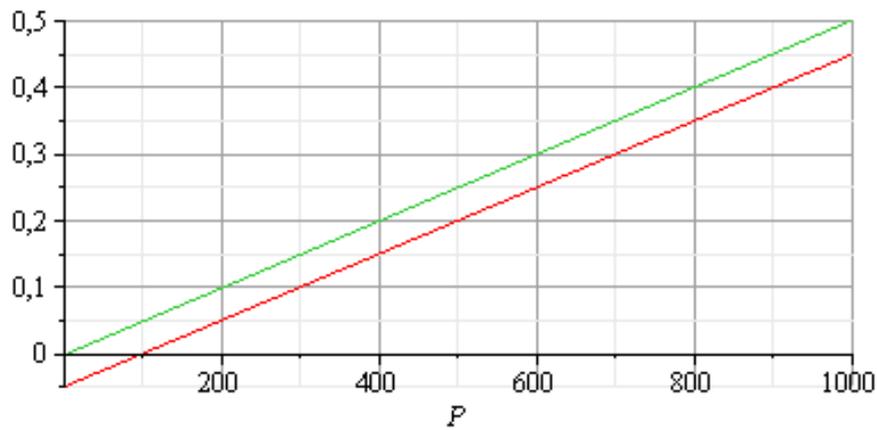
$$U_2 := 0.0005P$$

> `plot( $U_2$ ,  $P = 0 .. 1000$ );`



>

> `plot([ $U_1$ ,  $U_2$ ],  $P = 0 .. 1000$ );`

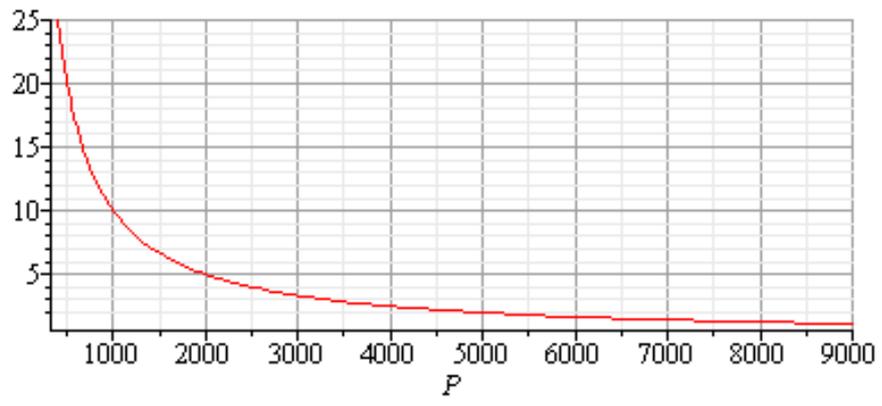


> Відносна похибка від адитивної складової :

>  $\delta := \left( \left| \frac{U_1 - U_2}{U_2} \right| \cdot 100 \right)$ ;

$$\delta := \frac{10000.00000}{|P|}$$

> `plot( $\delta$ ,  $P = 400 .. 9000$ );`



## ДОДАТОК Ж

Сертифікат Кучанського Владислава про участь у роботі International scientific  
and practical

conference “Science and technology:  
challenges,prospects and innovations”

(February 26-28, 2025) CPN

Publishing Group, Osaka, Japan.

2025. Загальна кількість академічних годин 24 години – 0.8 кредита ECTS

# CERTIFICATE

is awarded to

**Kuchanskyi Vladyslav**

for being an active participant in

VII International Scientific and Practical Conference

**“SCIENCE AND TECHNOLOGY: CHALLENGES,  
PROSPECTS AND INNOVATIONS”**

***24 Hours of Participation***

***(0,8 ECTS credits)***



**OSAKA**

**26-28 February 2025**

**sci-conf.com.ua**



## ДОДАТОК К

Результати комп'ютерного моделювання вимірювального каналу  
концентрації вуглекислого газу

> *Рівняння перетворення сенсора :*

>  $y := b \cdot P;$

$$y := b P$$

>  $h := \frac{U_0}{2^n};$

$$h := \frac{U_0}{2^n}$$

>  $N := \frac{y}{h};$

$$N := \frac{b P 2^n}{U_0}$$

>  $\delta_k := \frac{100}{N};$

$$\delta_k := \frac{100 U_0}{b P 2^n}$$

>  $P_{\min} := \frac{100 \cdot U_0}{\delta_{KH} \cdot b \cdot 2^n};$

$$P_{\min} := \frac{100 U_0}{\delta_{KH} b 2^n}$$

>  $P_{\max} := \frac{2^n \cdot H}{b};$

$$P_{\max} := \frac{2^n H}{b}$$

>  $b := 0.0005;$

$$b := 0.0005$$

> H := 0.00125;

$H := 0.00125$

>  $U_0 := 5.12$ ;

$U_0 := 5.12$

> n := 12;

$n := 12$

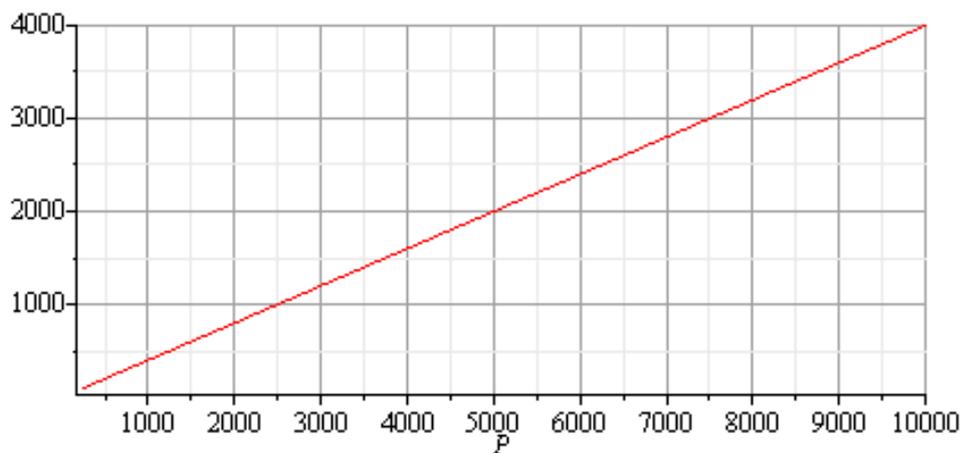
>  $N := \frac{Y}{h}$ ;

$N := 0.4000000000 P$

> Статична характеристика ВК;

*Статична характеристика ВК*

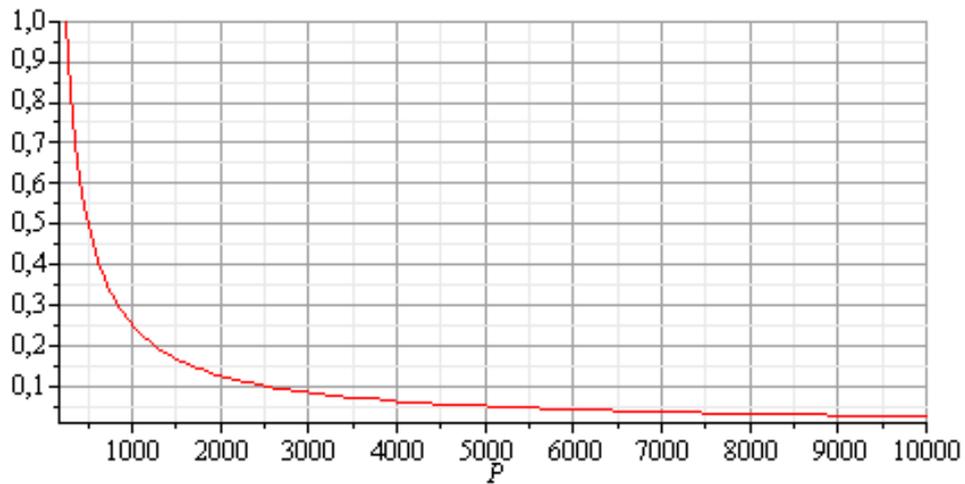
> plot(N, P = 250 ..10000 );



> Відносна похибка квантування ВК;

*Відносна похибка квантування ВК*

> plot( $\delta_k$ , P = 250 ..10000 );



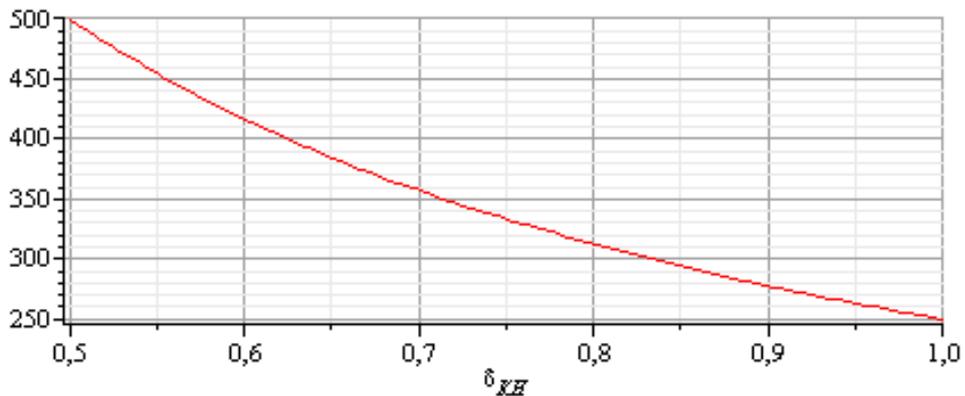
> Нижня межа вимірювання;

*Нижня межа вимірювання*

>  $P_{\min} := \frac{100 \cdot U_0}{\delta_{KH} \cdot b \cdot 2^n};$

$$P_{\min} := \frac{250.0000000}{\delta_{KH}}$$

> plot( $P_{\min}$   $\delta_{KH} = 0.5 \dots 1.0$ );

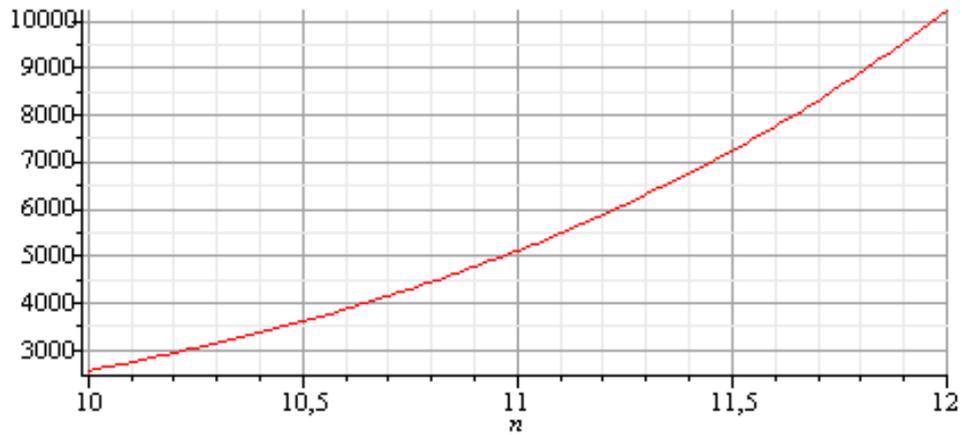


> Верхня межа вимірювання;

>  $P_{\max} := \frac{2^n \cdot H}{b};$

$$P_{\max} := 2.500000000 \cdot 2^n$$

> plot( $P_{\max}$   $n = 10 \dots 12$ );



> Розрядність двійкового лічильника :

> *Аапріорна ентропія :*

$$> H_1 := - \frac{1}{10000 - 250} \cdot \log_2 \left( \frac{1}{10000 - 250} \right) \cdot (10000 - 250);$$

$$H_1 := \frac{\ln(9750)}{\ln(2)}$$

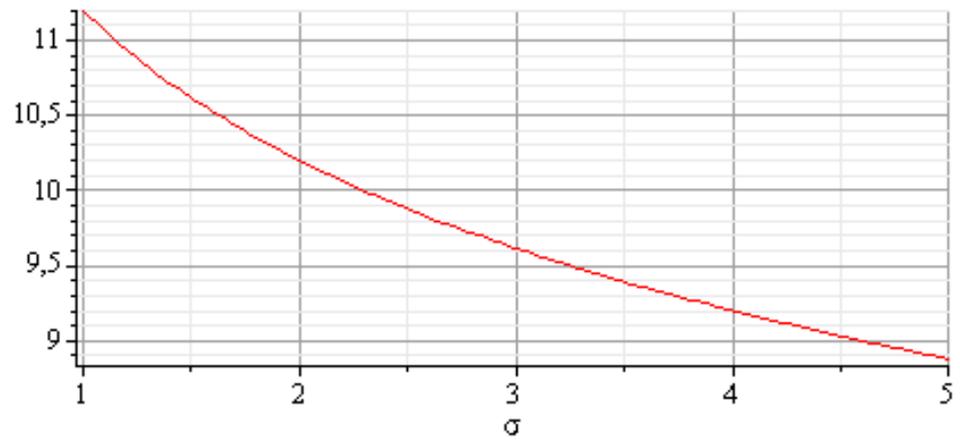
> *Апостеріорна ентропія :*

$$> H_2 := \log_2(\sigma \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 2.73});$$

$$H_2 := \frac{\ln(2.336664289 \sigma \sqrt{\pi})}{\ln(2)}$$

> *Кількість інформації :*

$$> \text{plot}(H_1 - H_2, \sigma = 1.0 \dots 5);$$



>

# ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система автоматизованого контролю та керування вмістом  
дихального газу в інкубаторних станціях  
Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота  
Відділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-23м/з

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 25 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М. \_\_\_\_\_ (прізвище, ініціали, посада)  
Гарант ОП Мошноріз М.М. \_\_\_\_\_ (прізвище, ініціали, посада)  
Особа, відповідальна за перевірку \_\_\_\_\_ (підпис)  
Паянок О.А. \_\_\_\_\_ (прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник \_\_\_\_\_ (підпис) Кухарчук В.В. \_\_\_\_\_ (прізвище, ініціали, посада)  
Здобувач \_\_\_\_\_ (підпис) Кучанський В.С. \_\_\_\_\_ (прізвище, ініціали)

08-24.МКР.001.00.000 ПЗ

№	Апр	№ документа	Подпись	Дата	Система автоматизованого контролю та керування вмістом вуглекислого газу в інкубаторних станціях	Лт	Міся	Місяць
Розробка		Кулиничий В. С.	<i>[Signature]</i>	20.05				
Програма		Кулинич В. В.	<i>[Signature]</i>	20.05				
Т. контр.								
Ревенз.		<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	10.06				
Модифікація		<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	02.06				
Базова		Мошнарів М.М.	<i>[Signature]</i>	03.06				

ВНТУ, гр. ЕПА-23мз