

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

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

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

**на тему**

**«Дослідження та розробка автоматизованої системи  
контролю процесу виробництва цукру – піску»**

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

\_\_\_\_\_ Денис Софієнко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Юрій ПАРХОМЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Олег КИСЛУН

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 року

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

Софієнка Дениса Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та розробка автоматизованої системи контролю процесу виробництва цукру-піску

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

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи 1. Розробити та дослідити автоматизовану систему контролю процесу виробництва цукру-піску 2. Провести аналіз існуючих систем; 3. Розробити функціональну схему системи, 4. Провести моделювання розробленої системи; 5. Виконати розрахунки по охороні праці

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Постановка задачі, оформлення ТЗ</i>	<i>20.10.25</i>	
2	<i>Пошук шляхів моделювання САР</i>	<i>28.10.25</i>	
3	<i>Розробка моделі компонента</i>	<i>06.11.25</i>	
4	<i>Розробка функціональної схеми САР</i>	<i>15.11.25</i>	
5	<i>Моделювання САР системи</i>	<i>20.11.25</i>	
6	<i>Оформлення ПЗ</i>	<i>26.11.25</i>	

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Ю.М. Пархоменко « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач \_\_\_\_\_ Д.В. Софієнко « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## Анотація

на випускню кваліфікаційну роботу студента групи АК-24М Софієнка Дениса Володимировича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Дослідження та розробка автоматизованої системи контролю процесу виробництва цукру – піску».

В даній магістерській роботі було проаналізована сучасний стан технології переробки соку в період сатурації при виробництві цукру-піску з метою створення комп'ютеризованої системи контролю процесу.

В ході виконання роботи були розроблені структурна схема системи контролю та принципова електрична схема блоку обробки вхідних аналогових сигналів та передачі цифрових даних до ПК, схема блоку реєстрації параметрів контролю функціональна та електрична принципові схеми системи контролю. В якості керуючої мікроЕОМ було обрано однокристальний мікроконтролер з вбудованим АЦП типу ATTINY44-20PU фірми Atmel. Виконано розрахунки на надійність системи в цілому.

**Ключові слова:** автоматизована система контролю; цукор-пісок; сатурація, сульфитація.

## Summary

for the final qualification work of the student of the AK-24M group Sofienko Denis Volodymyrovych in the specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics" on the topic: "Research and development of an automated control system for the production of granulated sugar".

This master's thesis analyzed the current state of juice processing technology during the saturation period in the production of granulated sugar in order to create a computerized process control system.

During the work, a structural diagram of the control system and a schematic electrical diagram of the input analog signal processing unit and digital data transmission to a PC, a diagram of the control parameter registration unit, functional and electrical schematic diagrams of the control system were developed. A single-chip microcontroller with a built-in ADC type ATTINY44-20PU from Atmel was chosen as the controlling microcomputer. Calculations were made for the reliability of the system as a whole.

**Keywords: automated control system; granulated sugar; saturation, sulfation.**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	2
1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ .....	7
1.1 Переробка буряка та отримання дифузійного соку.....	8
1.2 Очистка дифузійного соку .....	10
1.3 Сатурація.....	12
1.4 Одержання сиропу .....	14
1.5 Отримання кристалічного цукру .....	15
1.6 Трьох-продуктова схема кристалізації сахарози патоки .....	16
1.7 Отримання сатураційного газу та вапнякового молока.....	18
2. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ .....	20
2.1 Можливі шляхи вирішення задачі.....	20
2.2 Обґрунтування вибраного рішення.....	23
3. РОЗРАХУНКИ СИГНАЛІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ.....	26
3.1 Фізичні основи роботи .....	26
3.2 Залежність кількості адсорбованих молекул від температури .....	31
3.3 Принципи обробки сигналів сенсора.....	33
3.4 рН-вимірювання та водневий показник.....	38
4. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ САТУРАЦІЇ СОКУ .....	40
4.1 Визначення структурної схеми та елементної бази системи ..	40
4.2 Схемна реалізації системи контролю параметрів сатурації соку .....	43
4.3 Опис роботи розробленої системи контролю .....	50
4.4 Розрахунок блоку живлення .....	51

5	РОЗРАХУНОК НА НАДІЙНІСТЬ .....	58
	ВИСНОВКИ.....	64
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	65
	ДОДАТОК А.....	68

## ВСТУП

**Актуальність даної теми.** Інтенсивний розвиток цукрової промисловості вимагає максимальної автоматизації технологічних процесів. Забезпечення такої автоматизації можливе лише за умови створення ефективної системи контролю параметрів виробництва цукру-піску.

Наразі активно ведуться роботи зі створення комплексної системи контролю та управління процесом виробництва цукру-піску, інформація про яку частково використана в даній магістерській роботі. Це особливо критично для виробництва сатураційного газу та контролю рівня рН, соку в процесі його очищення (сатурації). Окрім стандартного контролю технологічних параметрів, проводяться наукові дослідження, зосереджені на вивченні багатокомпонентних газових сумішей. Така робота вимагає вдосконалення наявних та розробки нових методів і засобів контролю газових сумішей різної хімічної природи.

Метою даної магістерської роботи є розробка спеціалізованого блоку для визначення відсоткового складу сатураційного газу та встановлення залежності рН першої та другої сатурації від цього складу. Розроблений пристрій призначений для інтеграції в комп'ютеризовану систему автоматизованого виробництва цукру-піску.

Універсальний аналізатор виступає як один із периферійних блоків цієї системи, призначений для моніторингу вмісту компонентів сатураційного газу та рівня рН під час процесу сатурації.

В процесі роботи над проектом було проаналізовано різні методи та засоби вимірювання рН та складу газових сумішей. Виявлено, що існуючі засоби контролю забезпечують точність вимірювань на рівні  $5\div 10\%$ , що є недостатнім для дослідницьких та наукових цілей. Одним із прийнятних рішень є використання стаціонарного автоматичного газоаналізатора типу ТП 2221М, який функціонує на основі вимірювання теплопровідності газів.

До розроблюваного пристрою висувуються наступні ключові вимоги:

- Універсальність - здатність визначати концентрації та хімічний склад компонентів сатураційного газу;
- Чутливість - на рівні до одиниць об'ємних відсотків;
- Надійність - висока надійність і тривалий термін напрацювання до відмови;
- Роздільна здатність – висока;
- Інтеграція - робота в комп'ютеризованій системі автоматизованого виробництва;
- Конструкція - модульна побудова та малі габарити;
- Обробка даних – дискретна;
- Енергоспоживання - низьке;
- Точність - похибка на рівні 5-7 %.

**Метою даної магістерської роботи** є досягнення вищої ефективності технологічного процесу обробки цукрового соку, що є ключовим етапом у виробництві кінцевого продукту - цукру-піску.

**Об'єктом дослідження** - комп'ютеризована система керування процесом сатурації під час виробництва цукру-піску.

**Предметом дослідження** є автоматизування процесу сатурації під час виробництва цукру-піску.

**Методи досліджень.** Основою теорії планування експерименту є побудова математичної моделі повного факторного експерименту (ПФЕ) процесу сатурації. Моделювання та розрахунки виконувалися на сучасних персональних комп'ютерах із використанням вбудованих можливостей останніх версій програмних пакетів (MATLAB, Simulink).

**Практичне значення отриманих результатів.**

**Підвищення точності контролю процесу сатурації.**

Запропонований метод аналізу сатураційного газу, що базується на використанні тонкоплівкового напівпровідникового датчика, забезпечує точність вимірювань на 5–10% вищу порівняно з існуючими приладами аналогічного

призначення. Це дозволяє значно зменшити похибки визначення параметрів процесу сатурації та оптимізувати технологічні режими.

### **Підвищення ефективності виробництва цукру-піску.**

Створення комп'ютеризованої системи контролю дає змогу своєчасно відстежувати зміни складу газових сумішей у сатураційній колоні та оперативно реагувати на відхилення. Це сприяє більш стабільному протіканню процесу та покращенню якості кінцевого продукту.

### **Інтеграція в сучасні автоматизовані виробничі комплекси.**

Розроблена система сумісна з комп'ютеризованими технологічними лініями, що відповідає сучасному тренду переходу на цифрові системи керування. Це відкриває можливості для її впровадження в автоматизовані системи промислового типу (SCADA, MES).

### **Підвищення надійності технологічного процесу.**

Проведені розрахунки надійності підтверджують працездатність системи в умовах виробництва. Застосування мікроконтролера ATTINY44-20PU з вбудованим АЦП забезпечує стабільну обробку сигналів і мінімізує ризик збоїв у роботі.

### **Удосконалення технічного контролю на підприємстві.**

Створені структурна схема, принципові електричні схеми та функціональні блоки дають змогу впровадити систему у виробництво без додаткової фундаментальної розробки апаратної частини. Це спрощує монтаж, наладку та технічне обслуговування.

### **Відсутність аналогів у пострадянському просторі.**

Патентний пошук засвідчив новизну запропонованої розробки. Це дає можливість підприємствам отримати конкурентну перевагу, використовуючи унікальну технологію контролю процесу сатурації.

### **Підвищення безпеки праці персоналу.**

Завдяки детальному аналізу охорони праці та впровадженню технології контролю газових сумішей знижується ймовірність аварійних ситуацій, пов'язаних із витоком газів або порушенням режимів роботи обладнання.

### **Можливість масштабування та подальшого розвитку.**

Розроблену систему можна адаптувати для інших технологічних процесів у харчовій та хімічній галузях, де необхідний точний аналіз газових сумішей. Це підвищує її універсальність та практичну цінність у промисловості.

## 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ

Стрімкий розвиток цукрової промисловості як в Україні, так і за кордоном вимагає особливої уваги до модернізації технологічного обладнання підприємств, що займаються виробництвом цукру-піску. Сучасною тенденцією у цій галузі є впровадження повністю комп'ютеризованої системи автоматизованого управління виробництвом. Основним завданням такої системи є комплексне охоплення та централізоване керування всіма етапами технологічного процесу з мінімальним втручанням людини. Дані про технологічні параметри повинні бути доступними як на локальних виробничих ділянках, так і на робочих місцях керівництва — директора, головного інженера та головного технолога, а також мати можливість передаватися в будь-яку точку світу через Інтернет.

Реалізація подібної автоматизованої системи можлива лише після детального вивчення технології виробництва цукру та аналізу всіх етапів процесу. Модернізація обладнання має здійснюватися поступово, охоплюючи кожен виробничу ділянку й об'єднуючи всі робочі станції та контролери в єдину мережу.

Типовою технологією виробництва є отримання бурякового цукру-піску. Бурякова стружка безперервно екстрагується, після чого жом пресують, а фільтрат повертають у дифузійну установку. Дифузійний сік обробляють вапняно-вуглекислим газом, далі проводять три стадії кристалізації та споріднення жовтого утфелю. У коренеплодах цукрових буряків міститься 20...25% сухих речовин, з яких 14–18% припадає на сахарозу. Її добувають дифузійним методом: отриманий сік містить 15...16% сухих речовин, серед яких 14...15% сахарози та близько 2% несахарозистих домішок. Для очищення дифузійного соку його обробляють вапном, а надлишок вапна видаляють під час сатурації вуглекислим газом.

Після фільтрації насичений сік піддають сульфитації діоксидом сірки, що знижує його лужність і кольоровість. Далі сік згущують у два етапи: спочатку у

випарній установці до 55...65% сухих речовин, а потім у вакуум-апараті до 92,5...93,5%, отримуючи утфель. Після завершення кристалізації утфель I стадії центрифугують, утворюючи кристали цукру. Отриманий цукор-пісок із вологістю 0,8...1% сушать гарячим повітрям при 105...110 °С до 0,14% вологи (для зберігання у вигляді навалу потрібно досягти 0,03...0,04%).

Процес виробництва цукру-піску на підприємствах включає такі основні стадії:

- подавання буряків та очищення їх від механічних домішок;
- отримання дифузійного соку зі стружки;
- очищення дифузійного соку (вапнування, сатурація, сульфитація);
- згущення соку шляхом випарювання;
- варіння утфелю та кристалізація цукру;
- сушіння, охолодження та подальше зберігання готового цукру-піску.

Схему машин та обладнання лінії цукрово-бурякового виробництва наведено на рисунку 1.

### **1.1 Переробка буряка та отримання дифузійного соку.**

Цукровий буряк з кагатного поля по гідротранспортеру подається в завод при співвідношенні буряк/вода=1/7. В процесі транспортування відбувається очищення буряків від бруду на пастках для каміння та соломи, за рахунок різниці в густині буряка та домішок. Остаточне відмивання буряка від бруду виконується в мийних машинах, після чого він промивається чистою хлорованою водою і зважується.

Для виділення сахарози із буряка його ріжуть в стружку на дискових бурякорізках. Якість бурякової стружки оцінюється по її довжині на 100 г проби (оптимальною вважається довжина 10-14мм) та кількості браку (не розрізаних частин коротше 1см).

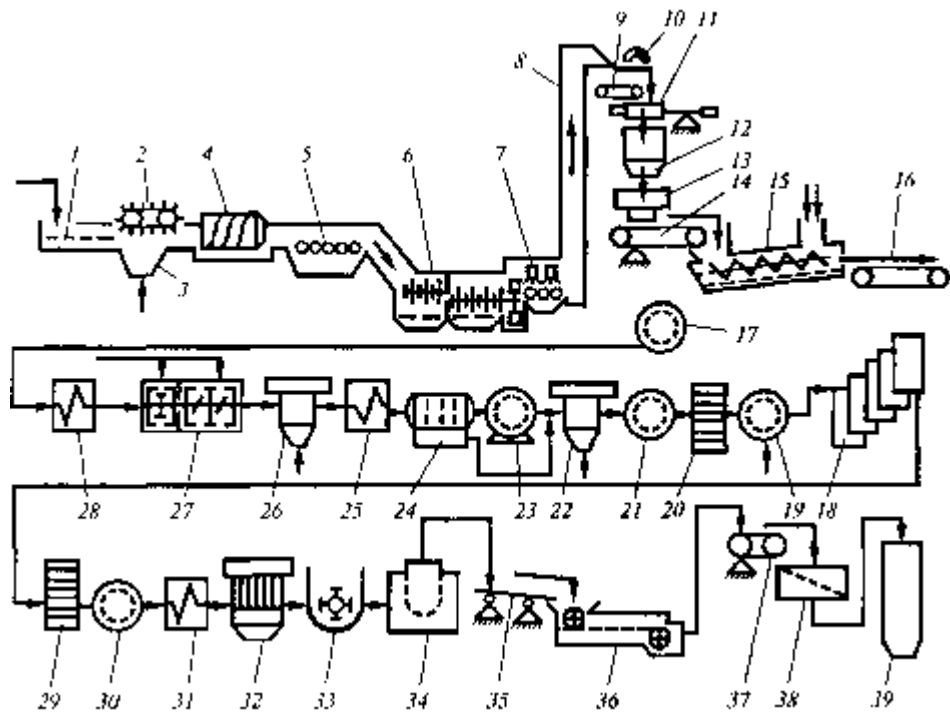


Рисунок 1 - Схема лінії виробництва цукру-піску з цукрових буряків:

1 - гідравлічний конвеєр ; 2 – соломоботволоушки; 3 - поглиблення для подачі повітря ; 4 - каменеловушки; 5 - водороздільники; 6 - мийна машина; 7 - спеціальний пристрій; 8 - елеватор; 9 - конвеєр; 10 - електромагніт; 11 - ваги; 12 - бункер; 13 - машини- бурякорізки; 14 - стрічковий конвеєр; 15 - дифузійна установка; - 16 - конвеєр; - 17 - фільтр; 18 - перший корпус випарної станції; 19 - станція фільтрів; 20 - котел сульфитації; 21 - фільтр; 22 - апарати другої сатурації; 23 - вакуум- фільтри; 24 - гравітаційний відстійник; 25 - підігрівач; 26 - котел першої сатурації; 27 - апарати попередньої та основної дефекації; 28 - підігрівач; 29 - сульфитатор; 30 - станція фільтрації; 31 - . підігрівач; 32 - вакуум - апарати першого продукту; 33 - приймальня утфелемішалка; 34 - центрифуга; 35 - віброконвеєр; 36 - сушильно -охладжувальна установка; 37 - ваговий стрічковий конвеєр; 38 – вібросито.

Екстрагування сахарози із бурякової стружки здійснюється в дифузійних апаратах за рахунок зустрічної обробки гарячою водою 60-70°C на протязі 60-65хв. В результаті цього концентрація сахарози в стружці зменшується, а в воді збільшується. Процес екстрагування сахарози підлягає основному закону дифузії Фіка

$$S = -DF(C - c)t/x,$$

де  $S$  – кількість розчиненої сахарози продифундованої через розчинник;  $C$  - концентрація сахарози в стружці;  $c$  - концентрація сахарози в розчині;  $t$  - тривалість процесу;  $x$  - товщина шару розчинника (довжина шляху дифундування);  $F$  - поверхня екстрагування;  $D$  - коефіцієнт дифузії, що залежить від температури дифузії та природи речовини, яка підлягає екстрагуванню.

## 1.2 Очищення дифузійного соку.

Дифузійний сік є складною багатокомпонентною системою. Він містить сахарозу та значну кількість нецукристих речовин, серед яких розчинні білки, пектинові сполуки та продукти їхнього розпаду, різні цукри, амінокислоти та інші компоненти. У процесі дифузії в сік переходить близько 98% сахарози та приблизно 80% розчинних нецукрів. Усі ці домішки негативно впливають на кристалізацію сахарози та збільшують її втрати з мелясою — кінцевим відходом виробництва.

Завдання етапу очищення соку полягає в максимально можливому видаленні нецукристих речовин і надлишкової вологи, щоб отримати прозорий та легко очищений сироп, придатний для подальшої кристалізації. Для цього застосовують фізичні та хімічні методи обробки. Нецукри, що містяться в дифузійному соку, дуже різноманітні за своєю хімічною природою і мають широкий спектр фізико-хімічних властивостей, що визначає відмінності у їхній поведінці під час очищення. Вода, що виділяється з апаратів, має темно-сірий колір, містить 3–5 г/л частинок жому та характеризується слабкокислою реакцією (рН 5,8–6,4). Для зниження вмісту калію використовують обертові пастки, а нейтралізацію та освітлення соку здійснюють за допомогою вапняного молока  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  концентрацією 1,19 г/см<sup>3</sup>. Вапно вводять у два етапи — попередню та основну дефекацію.

Попередня дефекація полягає в поступовому підвищенні рН соку шляхом протитечійного введення розбавленого вапняного молока (0,25%  $\text{CaO}$ ). Іони

кальцію спричиняють коагуляцію та осадження колоїдних речовин — білків, пектинів, барвників; осідають солі органічних кислот (шавлевої, лимонної, яблучної, винної, оцтової тощо) та деяких мінеральних кислот (сірчаної, фосфорної). Іони гідроксилу сприяють виведенню катіонів магнію, заліза, алюмінію у вигляді нерозчинних гідроксидів. У результаті сік освітлюється, набуває жовто-зеленого відтінку, а рН підвищується до значень 10,8–11,6. Під час попередньої дефекації видаляється приблизно 60% від загальної кількості нецукрів, формуючи осад, що має оптимальну структуру для подальшої фільтрації.

Основна дефекація призначена для розкладання під дією іонів гідроксилу та високої температури речовин, що редукують, а також солей амонію, амідів, білкових та пектинових компонентів. У ході реакцій утворюються солі кальцію відповідних органічних і мінеральних кислот. Частина вапна при цьому витрачається на реакції, але значна його кількість залишається в соку у вигляді осаду. При нижчих температурах розчинність вапна зростає, що впливає на процеси очищення.

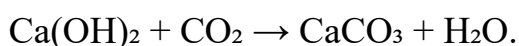
Таблиця 1.1 - Параметр технологічного процесу основної дефекації

Параметр технологічного процесу основної дефекації	Тип процесу дефекації		
	Холодна	Тепла	Гаряча
Температура, °С	40-50	50-60	85-90
Витрата вапна, % (до маси дифузійного соку)	85-120	85-120	85-120
Лужність, % СаО	0,8-1,1	0,8-1,1	0,8-1,1
Оптимальна тривалість з урахуванням повернення, хв.	20-30	10-15	5-10

### 1.3 Сатурація

Метою першої (I) сатурації є очищення соку шляхом адсорбції та утворення осаду  $\text{CaCO}_3$  із добрими фільтраційними властивостями. На цьому етапі відбувається поглинання солей кальцію та окремих кислот — продуктів лужного розпаду інвертного цукру, що утворюється під час основної дефекації. Особливо важливою є адсорбція поверхнево-активних речовин, які уповільнюють кристалізацію та негативно впливають на якість готового продукту.

Дефекований сік надходить у циркуляційний збірник, де змішується з 5–7-кратною кількістю соку I сатурації, який рециркулює по зовнішньому контуру. Далі сік обробляють сатураційним газом, що містить 28–32%  $\text{CO}_2$ . У цей час протікає реакція:



Утворений карбонат кальцію має колоїдну структуру та значну активну поверхню, на якій сорбуються нецукрівні компоненти дифузійного соку. Сатурація триває близько 10 хвилин до значень рН 10,8–11,6.

Після сатурації сік самопливом надходить у збірник і насосом через підігрівник перекачується в напірний збірник, розташований приблизно на 6 м вище листових фільтрів (ФІЛС).

У ФІЛСах сік I сатурації розділяється на фільтрат та згущену суспензію. Перевагами ФІЛС є їх проста конструкція, низька металоємність, компактність, у 3–5 разів коротший час фільтрування та вищий (у 1,5–2 рази) вміст твердої фази в суспензії, що підвищує ефективність роботи вакуум-фільтрів.

Згущена суспензія з нижнього та верхнього збірників надходить у вакуум-фільтри, де після відмивання і відділення осаду він виводиться у відходи. Фільтрат збирається у ресивері та змішується з нефільтрованим соком I сатурації в нижньому збірнику. Використання вакуум-фільтрів забезпечує повне видалення частинок осаду та промивання їх від залишків сахарози.

До фільтрованого соку, що надходить із ФІЛС, додають вапняне молоко (0,2–0,5% CaO від маси буряків), нагрівають до 92–95 °С і протягом 4–5 хвилин піддають додатковій дефекації. Отриманий сік самопливом подається в сатураційну установку, де протягом 20 хвилин обробляється газом до досягнення оптимальної лужності 0,01–0,025% CaO (рН 9–9,5). Після цього його перекачують у напірний збірник, фільтрують у листових фільтрах та направляють у сульфітатор для обробки газом із вмістом 10–12% SO<sub>2</sub> до лужності 0,05–0,1% CaO (рН 8,5–8,8).

Згущена суспензія соку II сатурації, що надходить зі збірника, повертається на попередню дефекацію. Кристали CaCO<sub>3</sub> із цієї суспензії мають високий позитивний ζ-потенціал і слугують ядрами для осадження коагульованих нецукрів.

Повернення саме суспензії II сатурації (замість нефільтрованого соку або суспензії I сатурації) дозволяє у кілька разів зменшити рециркуляцію соку, що позитивно впливає на його термостійкість та загальну якість.

II сатурацію проводять для повного осадження надлишкових іонів кальцію та видалення нецукрів при підвищеній лужності. Це необхідно для запобігання повторному переходу солей кальцію у розчин. На цьому етапі потрібно максимально знизити вміст іонів Ca і встановити лужність на рівні, достатньому для ефективною сульфитації, мінімального розкладання сахарози при випарюванні та отримання термостійкого соку і сиропу.

Фільтрований сік II сатурації піддають сульфитації — обробці газом із вмістом 10–12% SO<sub>2</sub>. Внаслідок цього рН зменшується до 8,5–8,7, знижується в'язкість соку. Основна мета сульфитації — зменшення його кольоровості завдяки перетворенню забарвлених сполук у безбарвні форми під дією сірчистого газу.

Після завершення сульфитації сік фільтрують і подають на стадію згущення.

Таблиця 1.2 - Параметри технологічного процесу сатурації

Параметр технологічного процесу сатурації	Перша сатурація	Друга сатурація
Тривалість, хв.	10	10
pH соку (по метилоранжі), од.	10,8 – 11,2	9,2 – 9,7
Вміст CO <sub>2</sub> в сатураційному газі, %	28- 36	28 - 36
Тиск сатураційного газу, МПа	0,04 – 0,06	0,04 – 0,06
Кількість рециркуляційного соку I сатурації, % (регулюється залежно від якості диф. соку)	300-800	-
Середня швидкість відстоювання, см/хв	2,5 - 5	3 – 5
Коефіцієнт використання сатураційного газу, %	65 - 75	65 - 70
Вміст солей Са, % СаО	-	0,03 – 0,1
Забарвленість, ум.од	-	не більше 18

#### 1.4 Одержання сиропу

Видалення води із соку здійснюється у випарній установці, де використовується принцип повторного застосування тепла та пари. Пара, що утворюється під час випарювання в першому корпусі, подається як гріюча в другий корпус. У міру переходу від першого до останнього корпусу температура і тиск пари зменшуються, тоді як концентрація сухих речовин та інтенсивність забарвлення соку зростають.

Високі температура й тиск у першому корпусі забезпечуються завдяки подачі гріючої пари з роторної парової турбіни ( $t = 132\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 0,3\text{ МПа}$ ). У останньому корпусі низькі температура кипіння та вакуум підтримуються за рахунок відведення сокових парів у барометричний конденсатор.

Під час згущення в соку відбуваються хімічні процеси: розкладання сахарози, редукуючих та азотистих речовин, утворення барвників, а також формування накипу на теплообмінних поверхнях. Якщо на стадії основної дефекації реакції розкладання зазначених сполук проведені недостатньо, вони тривають у випарній установці, що сприяє появі барвників, які потрапляють у готовий продукт. Порушення оптимального режиму очищення призводить до накопичення в соку солей кальцію, які при згущенні осідають у вигляді накипу.

У випарній установці сік концентрують до 60–65 % сухих речовин, видаляючи 100–115 % води від початкової маси. Отриманий сироп піддають сульфитації, далі фільтрують на дискових фільтрах із нанесеним шаром перліту або кізельгуру та направляють на етап кристалізації.

### **1.5 Отримання кристалічного цукру**

Основне призначення кристалізації полягає у максимальному виділенні сахарози, що міститься в сиропі, у кристалічному вигляді. Вибір необхідної кількості етапів кристалізації безпосередньо залежить від чистоти сиропу: якщо чистота нижче 90%, процес проводять у два етапи, тоді як при чистоті 90% необхідно три етапи. Сироп містить не лише сахарозу, а й нецукри, які є залишками домішок, не видалених під час очищення, або утворилися в процесі згущення. У результаті кристалізації сахарози утворюється суміш кристалів та міжкристального розчину, відомого як патока, де і накопичуються нецукри. Присутність і концентрація цих нецукрів ускладнюють кристалізацію сахарози, оскільки вони значно збільшують в'язкість розчинів. Урешті-решт, досягнення певного критичного співвідношення сахарози та нецукрів призводить до того, що процес кристалізації стає неможливим.

## 1.6 Трьох-продуктова схема кристалізації сахарози патоки

Патоку I-го продукту уварюють у вакуум-апараті із суміші сиропу й клеровки жовтого цукру. Процес уварювання складається із чотирьох етапів: згущення сиропу до перенасиченого стану (метастабільна зона перенасичення 1,20-1,25); утворення центрів кристалізації ("заведення кристалів") за рахунок введення тонко розмеленої цукрової пудри; нарощування кристалів до оптимального розміру; остаточне згущення й спуск патоки з вакуум-апаратів. Тривалість уварювання патоки 180-210 хв, температура 70-75 градусів, концентрація кристалів сахарози в патоці 50-55%, масова частка сухих речовин 92-92,5%. Кристали цукру відокремлюють від міжкристального розчину центрифугуванням, при цьому утворюються перший відтік ("зелений"), а після промивання кристалів гарячою артезіанською водою - другої відтік ("білий"). Кристали цукру, що мають вологість 0,8-1,0 %, інерційним конвеєром подаються в сушильне відділення. Патоку другого продукту уварюють із першого й другого відтоків патоки протягом 300-330 хв до масової частки сухих речовин в патоці 93 %, центрифугують із одержанням жовтого цукру другої кристалізації й загального відтоку. Патоку третього продукту уварюють із відтоку патоки другого, потім додають афінаційний відтік. Тривалість уварювання 420-840 хв, масова частка сухих речовин 93,5-94,0 %. За рахунок концентрації нецукрів в патоці останньої кристалізації швидкість кристалізації сахарози знижується. Для більш повного виділення сахарози, вводять кристалізацію охолодженням. Патоку останнього продукту з вакуум-апаратів направляють у прийомну мішалку, а потім у мішалки-кристалізатори, у пристрої, до яких подається холодна вода в протиструмені до патоки. Проходячи через батарею мішалок-кристалізаторів, патока за 36-48 годин проохолоджується на 30 градусів, що сприяє переходу частини сахарози з міжкристального розчину в кристали. Перед центрифугуванням патоку останнього продукту підігрівають на 6-8 градусів для зниження в'язкості міжкристального розчину. У процесі центрифугування патоки, одержують жовтий цукор і малясу. За існуючою технологією подальше

знецукрення маляси недоцільно через високий зміст нецукрів. Це є відходом цукрового виробництва, що містить близько 50 % сахарози; вихід маляси 5-6 % до маси переробленого буряка. Кристали жовтого цукру останньої кристалізації містять на поверхні плівку маляси, що знижує їхню чистоту. Для підвищення чистоти жовтий цукор змішують із розведеним першим відтоком патоки I. Цей процес називають афінацією, а отриману масу - афінаційною. Афінаційну масу центрифугують із відбором афінаційного жовтого цукру й афінаційного відтоку, що направляють на уварювання патоки останнього. Афінаційний жовтий цукор і жовтий цукор другої кристалізації розчиняють соком II сатурації до масової частки сухих речовин 65-70 % (клеровка), змішують із сиропом після випарної установки, сульфітують, фільтрують і направляють на уварювання патоки I кристалізації.

При центрифугуванні патоки I кристалізації на центрифугах ФПН-1251 при температурі 70-75 °С кристали промивають водою на протязі 15-30 с. Вологість кристалів цукру після центрифуг складає 0,8%. Патоку II кристалізації центрифугують при температурі 60-70 °С. Цукор II кристалізації має забарвленість не вище 100 ум.од.

Цукор водою не промивають і сушать в сушильно-охолоджувальному апараті СПС-20, при температурі 110-120 °С. Сушильна камера якого має розпушувальний пристрій - вібро-транспортер.

Для виловлювання із цукру-піску залізо-магнітних домішок використовують встановлені над транспортером електромагніти (металічні предмети, що випадково попали до складу цукрового буряка, виловлюються електромагнітом перед його зважуванням і попаданням до цукрорізки) після його . Потім цукор важать на напівавтоматичних вагах типу ДСП-100(похибка  $\pm 0,1$  %). Мішки з цукром масою нетто 50кг зашивають швейною машиною 33М з головками класу 38-Д (тканинні мішки) .

## 1.7. Отримання сатураційного газу та вапнякового молока

Процес обробки вапняку починається з його транспортування зі складу конвеєром на сортування. Відсортований вапняк подається у бункер-накопичувач, де формується шихта шляхом додавання палива через дозатор. Порція вапняку зважується разом із ковшем скіпового підйомника на вагах, після чого ківш піднімається напрямними до верху печі. При перекиданні шихта висипається у завантажувальну лійку, герметичність якої забезпечує клапан. У результаті випалу вапняку утворюється сатураційний газ, який через балку відбору газу потрапляє спочатку в суху пастку, а потім у газоочисник для фінального очищення та охолодження водою.

Проходячи через крапле-вловлювач, газ надходить у компресор, який подає його в апарати I та II сатурації. Для підтримки розрідження в газоочиснику та крапле-вловлювачі, видалення води з них відбувається через гідрозатор. Обпалене вапно по напрямному жолобу надходить у вапно-гасник, куди зі збірника подається вода, внаслідок чого утворюється вапняне молоко. Отримане молоко надходить на вібросито, де відокремлюються частки розміром понад 1,2мм, а потім у мішалку. З мішалки вапняне молоко насосом подається на стадію дефекації.

Отримання сатураційного газу – це один з важливих етапів при виробництві цукру-піску і швидкий, точний аналіз якості та вмісту є необхідним для виробництва. Очевидно, що рН соку в процесі очистки залежить від його хімічного складу та температури. Отже газ отриманий повинен аналізуватися приладом, який забезпечить вимірювання абсолютно всіх технологічних параметрів та передачу про них інформації головному інженеру і технологу.

Таблиця 1.3 - Технологічний процес отримання сатураційного газу та вапнякового молока

Технологічний процес отримання сатураційного газу та вапнякового молока		Технологічні параметри і показники процесу
Витрати вапняку CaO, кг\т		2000-2300
Витрати умовного палива, кг\т		150-200
Вміст CaO в вапні, %		75-85
Вміст сатураційного газу, %	CO <sub>2</sub>	28-36
	O <sub>2</sub>	3-5
	CO	До 1,1
Температура газу на виході з печі, °C		120-150
Температура газу на виході з газоочисника, °C		30
Температура при вивантаженні, °C		50-80
Температура води для гасіння вапна, °C		80
Густина вапнякового молока		1,18-1,22
Розрідження газу на виході з печі, кПа		0,5-7

## 2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ

### 2.1 Можливі шляхи вирішення задачі

На сьогодні одним із поширених методів контролю та аналізу газів є вимірювання їхньої теплопровідності. Теплопровідність — це фізична властивість газу, що відображає його здатність передавати тепло через безпосередній обмін енергією між молекулами. Загальна закономірність полягає в тому, що гази з найменшою молекулярною масою володіють найбільшою теплопровідністю,  $\text{CO}_2$  — 0,6,  $\text{O}_2$  — 1,013,  $\text{CO}$  — 0,96 і  $\text{CH}_4$  — 1,25 теплопровідності повітря.

Різниця теплопровідності газів дозволяє використати метод, її виміру, при аналізі. Якщо суміш складається із двох компонентів, то залежність теплопровідності газової суміші ( $\lambda_{см}$ ) від концентрації компонентів ( $c_1, c_2$ ) буде лінійною і аналіз газу не представляє труднощів.

$$\lambda_{см} = c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2$$

Аналіз багатоконпонентних газових сумішей (наприклад, димових газів) методом вимірювання теплопровідності є ускладненим, оскільки залежність теплопровідності від концентрації компонентів стає нелінійною та неоднозначною. Тому цей метод застосовують лише за умови, що співвідношення концентрацій невимірюваних компонентів залишається сталим, або якщо вживаються спеціальні заходи для підвищення вибірковості.

Значний інтерес у цій сфері викликають напівпровідникові газові датчики, які зараз виробляються масово. Їхня робота ґрунтується на тому, що провідність напівпровідників змінюється при адсорбції молекул газів на їхній поверхні. Подібно до того, як провідність змінюється при легуванні (введенні домішок, що теоретично обґрунтовано моделлю Корніґа-Пенні), адсорбція молекул із газового середовища на поверхні тонкої напівпровідникової плівки також призводить до зміни її електричних властивостей. Це явище широко

використовується для створення датчиків. Кремній є найбільш поширеним матеріалом для їхнього виготовлення.

Параметри датчиків залежать від температури навколишнього середовища, тому вони вимагають системи термостабілізації. Для підвищення селективності та точності необхідно враховувати нелінійні температурні залежності, які є унікальними для різних газів. Наразі розроблено та серійно випускається кілька сімейств таких газових датчиків, але їхнім головним недоліком є те, що вони зазвичай спрямовані на визначення лише одного конкретного виду хімічної речовини.

Основними напрямками в розробці газових датчиків являються розробки:

- датчиків неорганічних газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ )
- датчиків органічних газів та парів розчинників ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_3$ )
- датчиків фреонів (R-21, R-22, R-113, R-134<sub>a</sub>)
- датчиків забруднювачів повітря ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ )
- датчиків харчових випаровувань ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_5\text{H}_2\text{OH}$ )

Розробкою та виробництвом газоаналізаторів займаються такі відомі виробники як:

- Figaro Engineering Inc.
- ООО "ЭМИ" (IGM Instruments)
- Nemoto & Co.Ltd
- Sixth Sense
- Membrapor Inc.
- Dynament Limited

Докладні порівняльні характеристики дані в [7] та [8].

При виборі газового датчика, на відміну від інших комплектуючих, необхідно враховувати не лише технічні характеристики, а й доступність приладу, включаючи його ціну, можливість придбання та доцільність використання. Саме цими факторами керувалися при виборі сенсора TGS2602. Однак експериментально підтверджено, що цей тип сенсора не гарантує повторюваності результатів між різними екземплярами датчиків. Отже, для

забезпечення його точної роботи в газовому аналізаторі кожен окремий датчик потребує індивідуального калібрування.

### **Методи вимірювання рН**

Існує два основних методи визначення рН: колориметричний і потенціометричний.

Колориметричний метод заснований на зміні забарвлення індикатора, що додається до досліджуваного розчину, залежно від значення рН. Цей метод є недостатньо точним, вимагає введення сольових і температурних поправок, дає значну похибку при дуже низькій мінералізації досліджуваної рідини (менше 30 мг/л) і при визначенні рН у забарвленій і каламутній воді. Метод не можна використовувати для води, що містить сильні окислювачі або відновники. Зазвичай використовується в експедиційних ситуаціях і для приблизних визначень.

Потенціометричний метод набагато точніший, багато в чому позбавлений усіх зазначених недоліків, але вимагає оснащення лабораторії спеціальними приладами - рН-метрами. Потенціометричний метод заснований на вимірюванні ЕРС електродної системи, яка складається з індикаторного та порівняльного електродів. Електрод порівняння іноді називають допоміжним електродом.

Найбільш практичним є застосування як скляний індикаторний електрод, який можна використовувати в широкому діапазоні рН і в присутності окислювачів.

Крім скляного електрода, для визначення значення рН використовують також водневий, сурм'яний та інші електроди. Але вони не були поширені.

#### **Скляний електрод**

Скляний електрод виготовлений зі спеціальних видів скла, які мають певну електропровідність, достатньо високу, щоб тонка плівка такого скла могла бути включена як невід'ємна частина електричного кола. Для вимірювання величини рН використовується скло, електропровідність якого визначається рухом іонів  $H^+$  у склі (електропровідність будь-якого скла визначається здатністю

переміщувати катіони відносно нерухомого скелета – поліаніону). полімер кремнієвої кислоти) 59,16 мВ на пер одиниця рН при температурі +25 °С.

Справжній скляний електрод являє собою скляну трубку з дуже тонкостінною видувною кулькою на кінці, в яку наливають суспензію AgCl в розчині HCl і занурюють срібний дріт. Отже, всередині кулькової трубки знаходиться хлораргентумовий електрод. Для вимірювання значення рН скляний електрод занурюють у досліджуваний розчин (не вносячи в нього сторонніх речовин). Електрод порівняння занурюють безпосередньо в той же розчин або за допомогою електролітичного ключа.

Таким чином утворюється гальванічний елемент, що складається з хлораргентумового електрода та електрода порівняння, але внутрішній електролітичний контур цього елемента включає електропровідну скляну фольгу, а також досліджуваний розчин.

В отриманій системі за перенесенням електронів від хлораргентумового електрода до електрода порівняння, що відбувається під дією безпосередньо вимірної різниці потенціалів, неминуче слідує перенесення відповідної кількості протонів із внутрішньої частини електрод. електрод. скляний електрод у досліджуваному розчині. Якщо врахувати, що концентрація іонів H<sup>+</sup> всередині скляного електрода постійна, то виміряна ЕРС є лише функцією активності іонів водню, тобто. рН досліджуваного розчину.

## **2.2 Обґрунтування вибраного рішення**

Сенсор TGS2602 виробництва Figaro Engineering Inc. є тонкоплівковим напівпровідниковим датчиком, призначеним для визначення складу газової суміші. Він складається з нагрівача та тонкоплівкового чутливого елемента.

Принцип дії базується на абсорбції газів із навколишнього середовища на поверхні напівпровідникового чутливого елемента. Абсорбовані молекули діють як домішки, створюючи додаткові донорні або акцепторні енергетичні рівні у забороненій зоні напівпровідника.

Коли на нагрівач подається напруга, температура напівпровідника зростає, збільшуючи кінетичну енергію електронів. При досягненні певної критичної температури достатня частка електронів отримує енергію для подолання енергетичного бар'єру (від краю валентної зони до акцепторного рівня або від донорного рівня до краю зони провідності), що забезпечує помітний струм через чутливий елемент. Цей процес дозволяє вимірювати провідність. Після тривалого прогріву молекули адсорбованих домішок можуть випаровуватися з поверхні, що призводить до самовідновлення датчика.

Організація-виробник пропонує визначати вміст газів шляхом вимірювання провідності датчика при постійній температурі чутливого елемента, що дозволяє встановити відповідність між складом газової суміші та провідністю.

Проте, оскільки різні компоненти газової суміші створюють домішкові рівні на різній відстані від межі зони провідності, для їхнього впливу на провідність необхідний різний ступінь нагріву напівпровідника. Крім того, залежність адсорбції від температури поверхні є унікальною для кожної речовини.

Таким чином, при фіксованій температурі величина струму через елемент може вказувати на те, який саме компонент суміші адсорбований. Шляхом зміни температури датчика в певному інтервалі можна спробувати визначити хімічний склад газової суміші:

- При нижчих температурах провідність визначатиметься переважно компонентами, чиї рівні розташовані ближче до межі забороненої зони.
- З ростом температури зростає вплив на сумарну провідність компонентів, чиї рівні більш віддалені від межі зони провідності.

Характеристики газового датчика TGS2602 були предметом вивчення в процесі роботи над приладом.

Датчик має такі характеристики:

Максимальна напруга на нагрівачі

$5 \pm 0,2V$

Максимальна напруга на сенсорі	5±0,2В
Максимальна потужність, що розсіюється нагрівачем	0,28Вт.
Максимальна температура нагрівача	300° С.
Опір нагрівача при T=20° С	56Ом.
Опір нагрівача при T=300° С	91Ом.
Час прогріву датчика від T=20° С до T=300° С	60с.

Сенсор рН, типу STE8200 являє собою розробку фірми Burkert Fluid Control Systems.

Арматура	скляний стержень
Тиск середовища	0 – 3 бар
Температура середовища	0 - +130° С
Макс. тиск при макс. температурі	2 бар
Діафрагма	оксид цирконію
Контактний електроліт	провідниковий гель

Для досягнення необхідної швидкодії в приладі застосовуються високошвидкісні мікросхеми зі стабільними характеристиками. Центральним елементом системи є процесор, оскільки тільки процесорна система здатна забезпечити як високу швидкість обробки, так і первинну обробку даних, що є ключовою метою розробки приладу, зважаючи на необхідність передачі та подальшої обробки отриманої інформації. Як основний процесор використовується однокристальний 8-бітний мікроконтролер, що має інтегровану пам'ять, порти введення/виведення та аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Здатність цього пристрою функціонувати в режимі безперервних вимірювань, які повністю контролюються автоматикою і не потребують втручання оператора, дозволяє ефективно використовувати газоаналізатор для вирішення завдань у системах АСУ ТП (автоматизованих системах керування технологічними процесами).

### 3. РОЗРАХУНКИ СИГНАЛІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

#### 3.1 Фізичні основи роботи

У ізольованому атомі енергетичний спектр електронів дискретний. Заповнення енергетичних рівнів здійснюється по визначеним правилам. При цьому у s-стані може знаходитися два електрони, у p – 6, у d – 10, f – 14, g – 18 електронів. При утворенні кристалу в результаті хімічної взаємодії, валентні електрони сусідніх атомів усупільнюються і дискретні рівні розчіплюються в енергетичні зони, що можуть бути заповненими або вільними, в залежності від заповнення відповідних атомних рівнів.

У кристалах напівпровідників можна виділити три енергетичних зони: валентну зону, повністю заповнену електронами. Заборонену зону, у котрій немає енергетичних рівнів( в чистому напівпровіднику). Електрони знаходяться в цій зоні не можуть. Та зону провідності, вільну від носіїв заряду.

Якщо електрон з валентної зони збуджується в зону провідності, то у валентній зоні залишається його вакансія (дірка), при переміщенні якої по кристалу переноситься позитивний заряд. В такий спосіб заряд у кристалі може переноситися електронами, що знаходяться в зоні провідності, і дірками, що знаходяться у валентній зоні. У ідеальному кристалі, в якому відсутні дефекти та сторонні домішки( такий напівпровідник називається власним), кількість вільних електронів, електронів в зоні провідності ( $n$ ) дорівнює кількості дірок ( $p$ ), що відповідає деякому характеристичному розмірові, який називається власною концентрацією ( $n_i$ ):

$$n = p = n_i \quad (3.1)$$

Чим вужча заборонена зона, тим більше в напівпровіднику термічно збуджених носіїв заряду.

Концентрації вільних електронів у напівпровіднику залежить від температури по експоненціальному закону:

$$n = N_c \exp(-(E_c - F)/kT) \quad (3.2)$$

$$p = N_v \exp(-(F - E_v)/kT) \quad (3.3)$$

$$np = N_v N_c \exp(-(E_c - F)/kT) \exp(-(F - E_v)/kT) = N_v N_c \exp(-(E_g)/kT) = n_i^2 \quad (3.4)$$

Де  $N_c$  - ефективна густина станів в валентній зоні провідності

$$N_c = 2(2\pi m_n kT/h^2)^{3/2} \quad (3.5)$$

$N_v$  – ефективна густина станів в валентній зоні. Вона дорівнює

$$N_v = 2(2\pi m_p kT/h^2)^{3/2} \quad (3.6)$$

$F$  – енергія рівня Фермі;  $m_n$ ,  $m_p$  – ефективні маси електрона та дірки відповідно.

Положення рівня Фермі знаходять із умови електронейтральності для власного напівпровідника, тобто

$$n = p \quad (3.7)$$

Звідки:

$$F = 1/2(E_c + E_v) + kT/2 \ln(m_p/m_n), \quad (3.8)$$

Тобто при низьких температурах рівень Фермі лежить біля середини забороненої зони і з ростом температури поступово зміщується до зони провідності.

Наявність в кристалі домішок і дефектів призводить до появи в забороненій зоні енергетичних рівнів, місцезнаходження яких залежить від типу домішок чи дефекту. Так, наприклад, домішкові атоми В (третя група періодичної таблиці хімічних елементів) в кристалі Si приймають електрон з валентної зони, що веде до утворення дірок і появи діркової провідності (легований акцепторною домішкою матеріал отримав провідність "Р" типу). Атоми Р (5 група) в кристалі Si віддають електрони в зону провідності, що приводить до появи електронної провідності (легований донорною домішкою матеріал набуває провідність "N" – типу).

Процес іонізації акцепторного атома полягає в тому, що атом захоплює електрон і набуває негативного заряду, одночасно створюючи вільну дірку у валентній зоні кристала.

При низьких температурах більшість акцепторних атомів залишаються неіонізованими, і рівень Фермі розташовується між верхнім краєм валентної зони та акцепторним рівнем.

З підвищенням температури кількість електронів, що переходять із валентної зони на акцепторний рівень, зростає, що відповідно збільшує концентрацію дірок. При цьому рівень Фермі наближається до акцепторного рівня.

При досягненні певної температури настає область виснаження домішки: вся акцепторна домішка стає іонізованою, і концентрація дірок, що виникли за рахунок акцепторів, перестає змінюватися. У цій області рівень Фермі розташований вище акцепторного рівня.

Подальше зростання температури призводить до того, що концентрація носіїв заряду, які утворюються внаслідок міжзонних переходів (збудження електронів із валентної зони у зону провідності), перевищує концентрацію акцепторної домішки. В результаті залежність концентрації дірок від температури стає подібною до залежності у власному напівпровіднику, а рівень Фермі зміщується ближче до середини забороненої зони.

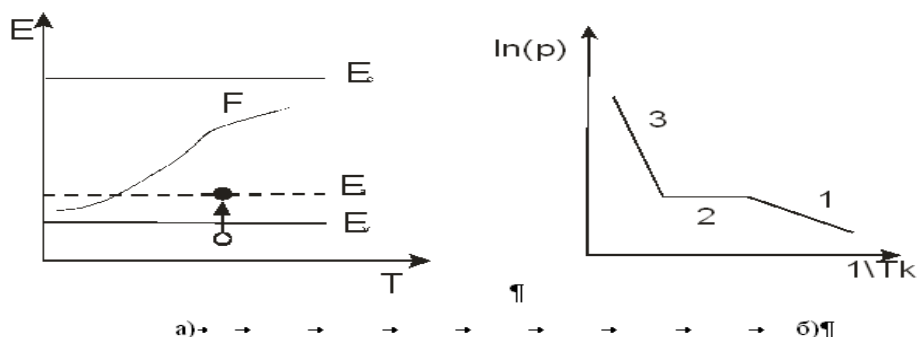


Рисунок 3.1 - Акцепторні домішки:

а) Енергетичні рівні молекул; б) Крива рівня Фермі.

При іонізації донорного атома він віддає електрон в зону провідності (Рис. 3.1) і заряджається прзитивно. При низьких температурах більша частина донорної домішки не іонізована і рівень Фермі розташований між дном зони провідності і донорним рівнем. При підвищенні температури число електронів, що переходять з донорного рівня в зону провідності зростає, відповідно зростає і концентрація вільних електронів( область 1 на праві верхні діаграмі рисунок 3.2). При цьому рівень Фермі наближається до донорного рівня. При деякій температурі вся домішка стає іонізованою і концентрація електронів( які виникли за рахунок іонізації донорів), перестає змінюватися. Це область виснаження донорної домішки( рівень Фермі в цій області нижче донорного рівня). При подальшому збільшенні температури настає момент, коли концентрація електронів, що появляються при їх збудженні з валентної зони в зону провідності стає більше концентрації донорної домішки і залежність концентраціїелектронів від температури приймає такий вигляд, що і у власному напівпровідникові, при цьому рівень Фермі знаходиться поблизу середини забороненої зони.

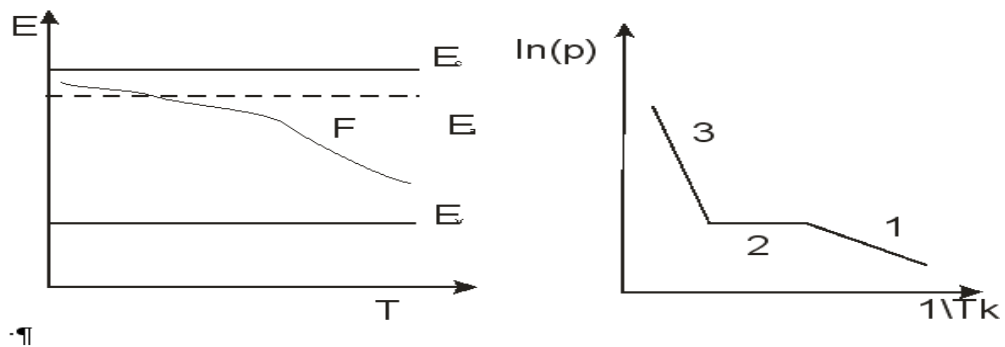


Рисунок 3.2 - Донорні домішки:

а) Енергетичні рівні молекул; б) Крива рівня Фермі

Газовий датчик представляє з себе тонку ( близько 30-100 мікрон) напівпровідникову плівку, розміщену на поверхні нагрівного елемента. При відсутності газового середовища провідність сенсора мала і обумовлена рухом

тільки електронів, перекинутих з валентної зони в зону провідності (власна провідність кристалу).

Принцип роботи вимірювачів забрудненості повітря, що використовують напівпровідникові детектори, ґрунтується на вимірюванні домішкової провідності датчика.

Коли молекули домішок адсорбуються на поверхні напівпровідникової плівки, у забороненій зоні утворюються додаткові домішкові енергетичні рівні. Очевидно, що густина станів на цих рівнях прямо пропорційна кількості молекул домішки, які осіли на поверхні.

Домішкова провідність напівпровідника, у свою чергу, пропорційна кількості носіїв заряду, які звільнилися внаслідок іонізації цих домішок. Звідси випливає, що провідність напівпровідника прямо пропорційна кількості атомів домішки, які осіли на його поверхні.

Кількість іонізованих атомів залежить не лише від температури, але й від стану енергетичного рівня домішки у забороненій зоні. При фіксованій температурі іонізація буде меншою, чим ближче енергетичний рівень домішки розташований до енергетичної зони (валентної чи провідності).

Надалі, при розгляді задач з малими концентраціями домішок, загальна кількість носіїв заряду в зоні провідності визначається як сума носіїв заряду, іонізованих окремо з кожного домішкового рівня.

Таким чином:

$$n_d = \sum N_d^i (1 + \exp(-(E_d^i - F)/kT))^{-1} \quad (3.9)$$

Дальші, концентрації дірок в валентній зоні, можна записати аналогічне співвідношення, взяте з (3.9) і використане в (3.10)

$$n_a = \sum N_a^i * (1 + \exp(-(F - E_a^i)/kT))^{-1} \quad (3.10)$$

При записі (3.9) і (3.10) не врахований вплив передавання носіїв заряду з валентної зони в зону провідності. Однак, можна показати, що цей внесок набагато менший від внеску домішок.

Використовуючи визначення провідності речовини  $j = \sigma E$ , матимемо вираз, зв'язуючи вираз напівпровідника з концентраціями носіїв заряду в ньому.

$$\sigma = e n_d \mu_d + e n_a \mu_a \quad (3.11)$$

Підставляючи в (3.11) вираз для  $n_d$  і  $n_a$  одержимо вираз для  $\sigma$

$$\sigma = e (\mu_d \sum N_d^i * (1 + \exp(-(E_d^i - F)/kT))^{-1} + \mu_a \sum N_a^i * (1 + \exp(-(F - E_a^i)/kT))^{-1})$$

$$\sigma = (\sum e \mu_d N_d^i * (1 + \exp(-(E_d^i - F)/kT))^{-1} + \sum e \mu_a N_a^i * (1 + \exp(-(F - E_a^i)/kT))^{-1})$$

Позначаючи

$$\sigma_d^i = e \mu_d N_d^i * (1 + \exp(-(E_d^i - F)/kT))^{-1}$$

$$\sigma_a^i = e \mu_a N_a^i * (1 + \exp(-(F - E_a^i)/kT))^{-1}$$

Перетворимо вираз для  $\sigma$  од вигляду

$$\sigma = \sum \sigma_d^i + \sum \sigma_a^i \quad (3.12)$$

В останньому виразі величини  $\sigma_d^i$  і  $\sigma_a^i$  являються провідностями, обумовленими іонізацією і-ї донорної чи акцепторної домішки (дальші ці величини називаються парціальними провідностями). Таким чином, сумарна провідність напівпровідника розраховується, як сума парціальних провідностей від кожної з домішок.

### 3.2 Залежність кількості адсорбованих молекул від температури

Ударяючись об поверхню твердого тіла молекули газу адсорбуються. Час адсорбції чи перебування молекул в адсорбованому стані залежить від теплоти адсорбції і описуються рівнянням Френкеля.

$$\tau_a = \tau_0 \exp(Q_a/RT) \quad (3.13)$$

де  $\tau_0$  - мінімальний час перебування молекули в адсорбованому стані (по порядку величини  $\tau_0$  відповідає значенню  $10^{-13}$  с),  $Q_a$  - теплота адсорбції, розрахована на моль газу.

Основні складові повітря мають теплоти адсорбції на різних поверхнях у межах від 10 до 20 кДж/кмоль. Час їхньої адсорбції при кімнатній температурі становить порядку  $10^{-13}$  с.

Для знаходження залежності кількості адсорбованих молекул від температури скористаємося умовою сталості ступеня покриття (відношення площі адсорбованих молекул до площі поверхні адсорбуючого тіла).

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 \quad (3.14)$$

Умова адсорбційної рівноваги на поверхні полягає в рівності швидкостей випару й конденсації молекул. Величина  $a_m$  кількість молекул, необхідне для утворення моношару на поверхні твердого тіла.  $\Theta$  - ступінь покриття поверхні.

$$\frac{d\theta}{dt} \cdot a_m = \mu - \nu \quad (3.15)$$

Де  $\Theta$  ступінь покриття поверхні. З останнього рівняння слідує:

$$\Theta = \mu/\nu \quad (3.16)$$

Величина  $\nu$  визначається як швидкість випаровування газу з поверхні, покритої мономолекулярним шаром.

$$\nu = a_m/\tau_a \quad (3.17)$$

Значення  $\mu$  визначається як кількість молекул, що вдарилися об поверхню, помножене на ймовірність поглинання молекули газу на поверхні

$$\mu = f \frac{n}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (3.18)$$

Підставляючи (3.18) і (3.17) в (3.16) і з огляду на вираз для  $\tau_a$  маємо

$$\theta = \frac{fn}{a_m} \sqrt{\frac{2kT \cdot \tau_0 \exp(Q_a / RT)}{\pi m}} \quad (3.19)$$

Підставляючи в (3.19) вираження для  $n = P/(k)$  одержуємо остаточний вираз

$$\theta = \frac{fP}{a_m} \sqrt{\frac{2\tau_0 \exp(Q_a / RT)}{\pi m k T}} \quad (3.20)$$

Для визначення кількості домішкових носіїв заряду в напівпровідниковій плівці, адсорбувавшій домішку, необхідно підставити в (3.9) і (3.10) вираз для кількості атомів домішок, отримані з (3.20).

Припускаючи незалежність  $f$  від температури одержуємо.

$$n_d = \Theta S_0 \quad (3.21)$$

$$n_d = A(P, S_0) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_0 \cdot \exp(Q_a / N_a \cdot 1/kT) \cdot \pi k T}{(1 + \exp(-(E_d - F)/kT))}} \quad (3.22)$$

В останньому виразі  $A(P, S_0)$  незалежна від температури й властивостей напівпровідника константа.  $N_a$  - постійна Авогадро. З останнього виразу видно, що на кількість електронів у зоні провідності впливають два конкуруючі процеси – викид електронів у зону провідності, що збільшується з ростом температури і зменшення кількості домішкових рівнів з ростом температури.

### 3.3 Принципи обробки сигналів сенсора

Очевидно, існує пряма залежність: чим вища концентрація молекул домішки в навколишньому газі, тим більша кількість молекул абсорбується на поверхні тонкоплівкового чутливого елемента сенсора, і, відповідно, тим більшою буде зміна його електропровідності. Важливо врахувати, що при концентраціях домішок, які становлять практичний інтерес, ступінь покриття поверхні сенсора є значно меншим за одиницю. За таких умов зміну провідності чутливого елемента, що виникає через появу домішок із концентрацією  $C$  у навколишньому газі, можна вважати лінійно та адитивно пов'язаною з цією концентрацією.

$$\sigma = C_i \cdot \sigma_i \quad (3.23)$$

де підсумовування йде по видах домішок,  $\sigma_i$  - відповідні коефіцієнти пропорційності. Коефіцієнти  $\sigma_i$  залежать від температури, це спричиняється

сумарну залежність від температури електропровідності чутливого елемента сенсора.

Співвідношення (3.23) виражає зміст гіпотези лінійної адитивності результуючої термограми: передбачається, що спостережувана залежність  $\sigma(T)$  є сума "парціальних" провідностей, кожна з яких відбиває внесок окремої домішки в навколишньому газі в сумарну електропровідність чутливого елемента сенсора.

У рамках цієї гіпотези завдання визначення "парціальної концентрації" домішок зводиться до рішення зворотного завдання - підбору таких значень  $C_i$ , які при відомих температурних залежностях коефіцієнтів  $\sigma_i(T)$  щонайкраще описують спостережувану термограму  $\sigma(T)$ .

Найбільш простий шлях рішення цього завдання - розглядати співвідношення (3.23) при декількох температурах як систему лінійних рівнянь для невідомих  $C_i$ , якщо число крапок по температурі вибрати рівним числу невідомих концентрацій, то система легко вирішується. Недолік цього методу очевидний - результат буде залежати від довільного вибору температурних точок. Реально варто використати які-небудь інтегральні методи, що враховують поведінку термограми  $\sigma(T)$  на всім інтервалі, що представляє інтерес, зміни температури. Деякі з таких методів обговорюються нижче.

В основі інтегральних методів, що обговорюються нижче, лежать уявлення про еталонні термограми - залежності  $\sigma(T)$ , обумовлених тільки одним видом домішок, єдиним чином нормованих. Будемо позначати ці термограми через  $\sigma_i$ . Спосіб нормування може бути обраний з міркувань, що нав'язують внутрішньою логікою використовуваного методу й не пов'язаний з вимогою нормування на якимось чином задану одиничну концентрацію домішки. Останню вимогу можна задовольнити введенням додаткових коефіцієнтів переходу між реальними й "внутрішніми" нормувальними коефіцієнтами. Питання про нормування еталонних термограм тісно пов'язаний також із проблемою вибору аргументу функцій. Дотепер всі функції представлялися

залежними від температури  $T$ . Реально, залежності  $\sigma$  і  $\Delta\sigma$  знімаються як функції часу з початку прогріву сенсора. Для практичних цілей зручно саме цю величину приймати за аргумент функцій, причому після очевидного лінійного перетворення  $x=t/t_{\max}$  можна одержати аргумент  $x$ , що міняється в інтервалі  $[0\dots 1]$ . Це буде передбачатися нижче. Функції  $\sigma_i(x)$  будуть передбачатися нормованими в класі  $L_2$  на одиницю:

$$\int \sigma_i(x) \sigma_j(x) dx = (\sigma_i(x) \sigma_j(x))$$

Під скалярним добутком функцій будемо розуміти вираз

$$\sum \sigma_i(x_k) \sigma_j(x_k) = (\sigma_i(x) \sigma_j(x))$$

Де сума береться по всіх можливих значеннях  $x$  в інтервалі  $[0 \ 1]$ .

Тоді маючи термограму суміші  $\sigma_{\text{суміші}}(x)$  можна записати

$$\sigma_{\text{суміші}}(x) = \sum A_i \sigma_i(x) \quad i=1..n$$

$A_i$  коефіцієнти (концентрації еталонних домішок), що підлягають визначенню. Домножуючи на  $\sigma_j(x)$  і інтегруючи маємо

$$\int \sigma_{\text{суміші}}(x) \sigma_j(x) dx = \int \sigma_j(x) \sum A_i \sigma_i(x) dx$$

$$(\sigma_{\text{суміші}}(x) \sigma_j(x)) = \int \sum A_i \sigma_i(x) \sigma_j(x) dx$$

$$(\sigma_{\text{суміші}} \sigma_j) = \sum A_i (\int \sigma_i(x) \sigma_j(x) dx)$$

$$(\sigma_{\text{суміші}} \sigma_j) = \sum A_i (\sigma_i \sigma_j)$$

$$j=1..n$$

$$(3.24)$$

Вираз (3.24) являє собою систему лінійних рівнянь щодо шуканих чисел  $A_i$ . Коефіцієнти  $(\sigma_i, \sigma_j)$  відомі.

Як було показано вище для визначення концентрацій домішок у газовій суміші необхідно вирішити систему з  $n$  рівнянь (20). Однак, серед шуканих чисел  $A_i$  можуть здаватися й від'ємні числа, що є рішеннями вихідної системи. Від'ємні рішення системи (20) фізичного змісту, мабуть, не мають. Для того, щоб уникнути появи негативних "концентрацій" програма інтерпретації результатів діє в такий спосіб:

$$\text{Нехай } B_j = (\sigma_{\text{суміші}} \sigma_j), \quad M_{ij} = (\sigma_i \sigma_j)$$

Тоді (20) можна переписати у вигляді



Швидке звуження кола речовин, присутність яких передбачається в суміші.

Незалежність стійкості роботи алгоритму від властивостей матриці М

Недоліками даного методу є:

1. Можливість одержання «порожнього» рішення, якщо на якомусь кроці всі рішення виявляються від'ємними.
2. Неможливість повернення в систему для визначення концентрацій рядків і стовпців, вилучених на попередніх кроках.

Мінімізація нев'язкі.

Завдання ставиться таким чином, що потрібно мінімізувати функцію

$$\Delta = \sum (F - \sum X_i F_i(X_j))^2$$

при додаткових обмеженнях  $X_i > 0$ .

Для рішення цього завдання може застосовуватися симплекс-метод, або інші методи математичного програмування.

Достоїнствами даного методу є:

1. Надійність одержання рішення. Завжди буде отримане яке-небудь рішення - у крайньому випадку рішенням буде визнане початкове наближення.
2. Можливість повернення в систему для визначення концентрацій елементів, вилучених на попередніх кроках.

Недоліками даного методу є:

1. Залежність методу від властивостей матриці М. Коректна робота можлива лише тільки у випадку позитивно визначеної матриці.
2. Невисока швидкість роботи як через складність алгоритму, так і завдяки великій кількості ітерацій.
3. Можлива залежність остаточного результату від вибору початкового наближення рішення. ( у випадку, якщо в нев'язання є більше одного мінімуму в розглянутій області).
4. Складність алгоритму.
5. Визначення „сумарної концентрації невідомих речовин” -  $C = 1/N$  для функції відгуку  $G(x_j) = (F - \sum X_i F_i(x_j))$ .

При розробці приладу перевірялася робота алгоритму визначення концентрацій. Остаточний вибір був зроблений на користь першого методу визначення концентрацій як через меншу кількість обмежень, що накладають на вихідні дані, так і через більшу логічність.

### 3.4 рН-вимірювання та водневий показник

Вода є слабким електролітом; вона слабо дисоціює по рівнянню



При 25 °С у 1 л води розпадається на іони  $10^{-7}$  моль  $\text{H}_2\text{O}$ . Концентрація іонів  $\text{H}^+$  й  $\text{OH}^-$  (у моль/л) буде дорівнювати

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$$

Чиста вода має нейтральну реакцію. При додаванні в неї кислоти концентрація іонів  $\text{H}^+$  збільшується, тобто  $[\text{H}^+] > 10^{-7}$  моль/л; концентрація іонів  $\text{OH}^-$  зменшується, тобто  $[\text{OH}^-] < 10^{-7}$  моль/л. При додаванні лугу концентрація іонів  $\text{OH}^-$  збільшується, тобто  $[\text{OH}^-] > 10^{-7}$  моль/л; отже,  $[\text{H}^+] < 10^{-7}$  моль/л. На практиці, для вираження кислотності або лужності розчину замість концентрації  $[\text{H}^+]$  використовують її негативний десятковий логарифм, що називають водневим показником рН:

$$\text{pH} = -\lg [\text{H}^+]$$

У нейтральній воді  $\text{pH} = 7$ . Для розчинів з кислою реакцією  $\text{pH} < 7$ . Для розчинів з лужною реакцією  $\text{pH} > 7$ . Якщо врахувати, що властивості розчинів залежать від активності іонів, що перебувають у них, то треба наведене вираження записати у вигляді:

$$\text{pH} = \lg a_+$$

У розведених розчинах значення концентрації й активності збігаються й тільки при високій мінералізації можуть бути значні розбіжності. У цей час рН вважається характеристикою активності іонів водню. Тому, іноді в символ рН вводять нижній індекс "а":  $\text{pH}_a$  або  $\text{p}_a\text{H}$ . Звичайно, це робиться, коли необхідно

явно підкреслити відмінність визначення водневого показника через концентрацію або активність.

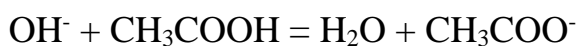
Багато аналітичних реакцій проводять при строго певнім значенні рН, що повинне зберегтися протягом усього часу проведення реакції. У ході деяких реакцій рН може змінюватися в результаті зв'язування або вивільнення іонів  $H^+$ . Для збереження постійного значення рН застосовують буферні розчини.

Буферні розчини являють собою найчастіше суміші слабких кислот із солями цих кислот або суміші слабких підстав із солями цих же підстав. Якщо, наприклад, в ацетатний буферний розчин, що складається з оцтової кислоти  $CH_3COOH$  й ацетати натрію  $CH_3COONa$  додати деяку кількість такої сильної кислоти, як  $HCl$ , вона буде реагувати з ацетатами-іонами з утворенням малодисоціюючої  $CH_3COOH$ :



Таким чином, додані в розчин іони  $H^+$  не залишаться вільними, а будуть зв'язані іонами  $CH_3COO^-$ , і тому рН розчину майже не зміниться.

При додаванні розчину лугу до ацетатного буферного розчину іони  $OH^-$  будуть зв'язані недисоціюючими молекулами оцтової кислоти  $CH_3COOH$ :



Отже, рН розчину й у цьому випадку також майже не зміниться.

Буферні розчини зберігають своя буферна дія до певної межі, тобто вони мають певну буферну ємність. Якщо іонів  $H^+$  або  $OH^-$  виявилось в розчині більше, ніж дозволяє буферна ємність розчину, то рН буде змінюватися в значній мірі, як й у небуферному розчині. Звичайно в методиках аналізу вказується, яким саме буферним розчином варто користуватися при виконанні даного аналізу і як його варто приготувати.

Для настроювання рН-метрів застосовують стандартні буферні розчини з точними значеннями рН.

Прийнята в Україні по стандарту 8.134-74 шкала рН заснована на відтворених значеннях рН декількох розчинів. Шкала рН має внутрішню погодженість, тобто експериментально обмірювана величина рН не залежить від того, який з розчинів був обраний у якості стандартного.

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

### 4.1 Опис структурної схеми пристрою з ВРЛС

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

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

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

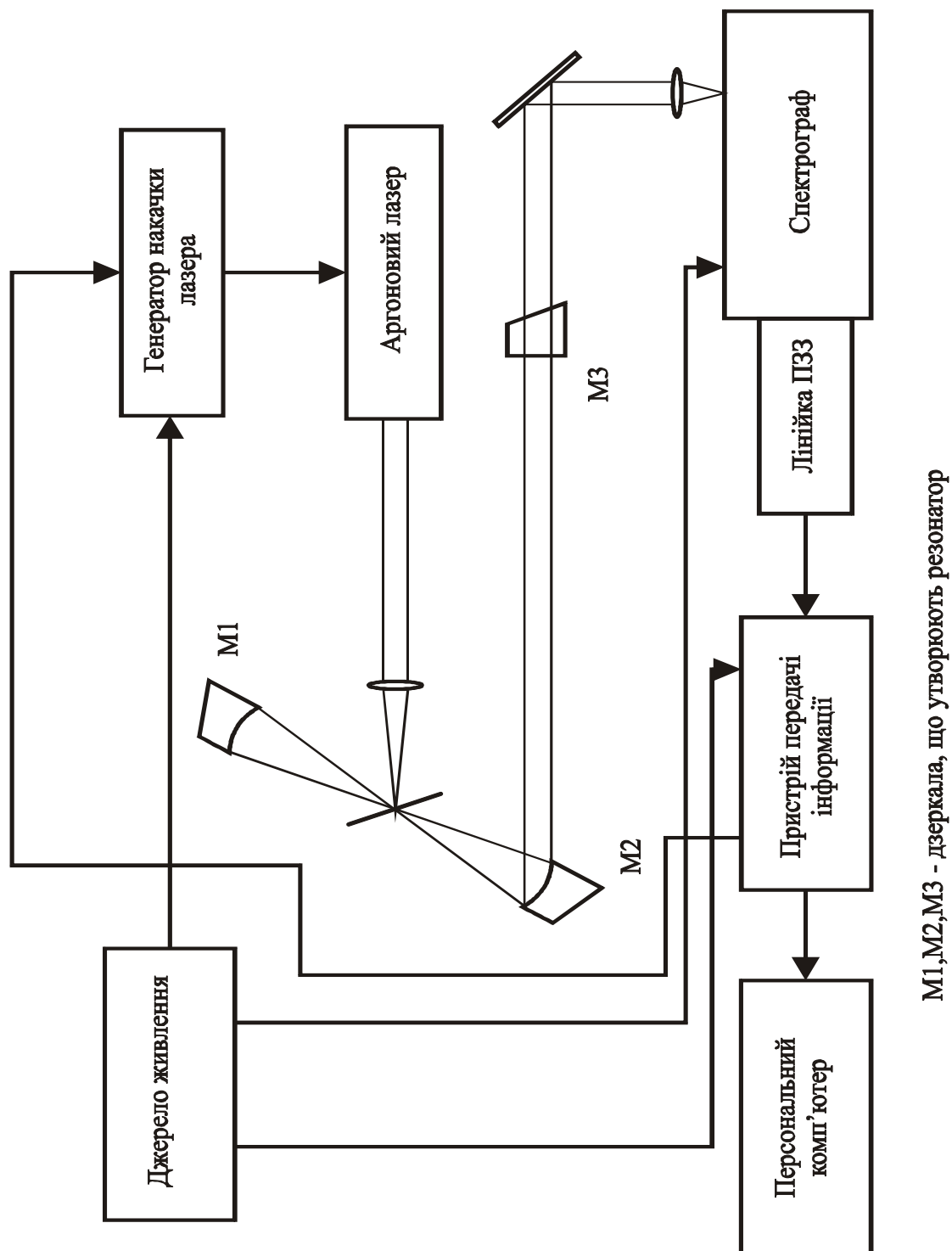


Рисунок 4.1 – Структурна електрична схема газоаналізатора

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

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

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

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

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

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

Перші прилади з зарядовим зв'язком (ПЗЗ) були створені у 1970 році. Спочатку їх застосовували як більш ефективну багатоканальну альтернативу фотодіодам і фотодіодним матрицям. Найбільших результатів ПЗЗ досягли під час реєстрації дуже слабких світлових потоків у галузях мікробіофізики, хімічної та ядерної фізики, а також астрофізики. Починаючи з 1975 року ПЗЗ-матриці активно використовуються як телевізійні світлоприймачі, і вже у 1989 році

близько 97% телевізійних приймачів застосовували саме такі детектори, тоді як за 10 років до того їхня частка становила лише близько 2%.

Тривалий час широке впровадження ПЗЗ у телетехніці стримували недоліки виробничих технологій: труднощі виготовлення світлочутливих елементів потрібних розмірів, неоднорідність квантового виходу, геометрична нестабільність, низька роздільна здатність та різного типу шуми як на рівні окремих пікселів, так і в масштабах десятків пікселів. Лише вдосконалення технології виробництва та розвиток електронних компонентів, передусім більш потужних і швидкодіючих АЦП, забезпечили можливість масового використання ПЗЗ. Зменшення вартості, габаритів і енергоспоживання зробило їх конкурентними не лише у професійній та науковій техніці, але й у побутових пристроях.

Принципово ПЗЗ можна представити як ряд щільно розташованих МДН-конденсаторів. МДН-структури почали виготовляти наприкінці 50-х років, і вже через десять років були створені передумови для появи пристроїв із переносом заряду. Головна фізична особливість ПЗЗ полягає в тому, що сигнал у них передається у вигляді заряду. Послідовність тактових імпульсів на електродах дозволяє переносити зарядові пакети між сусідніми елементами. Саме тому ці прилади й отримали назву пристроїв з зарядовим зв'язком або перенесенням заряду.

Робота ПЗЗ базується на внутрішньому фотоефекті: поглинання фотона у кремнії генерує пару електрон-дірка, і електростатичне поле розділяє їх, затримуючи електрони у потенційній ямі під електродом із позитивним потенціалом. Таким чином електрони можуть зберігатися досить тривалий час, а кероване тактування забезпечує їх послідовний перенос у регістр зчитування. Перевагою ПЗЗ є те, що керувати будь-яким ланцюгом затворів можна всього трьома тактовими шинами, що забезпечує властивість самосканування.

У більшості конструкцій лінійка пікселів містить накопичувальні елементи (фотодіоди), а з обох боків розташовані регістри зчитування для парних і непарних елементів.

У нашому випадку використовується ПЗЗ-лінійка японської компанії **НАМАМАТСУ**, модель **G9208**, призначена для спектрофотометрії у ближній інфрачервоній області. Вона працює в широкому динамічному діапазоні та забезпечує високий коефіцієнт підсилення. Основні характеристики G9208:

- кількість пікселів — 256;
- розмір пікселя —  $50 \times 250$  мкм;
- спектральний діапазон — 0,9–2,55 мкм.

На рисунку 4.2 наведено спектральні характеристики різних серій лінійних перетворювачів. Видно, що вибір зроблено на користь G9208 завдяки його найбільш широкій спектральній області, що дозволяє фіксувати більше газових компонентів та різноманітних молекулярних сполук.

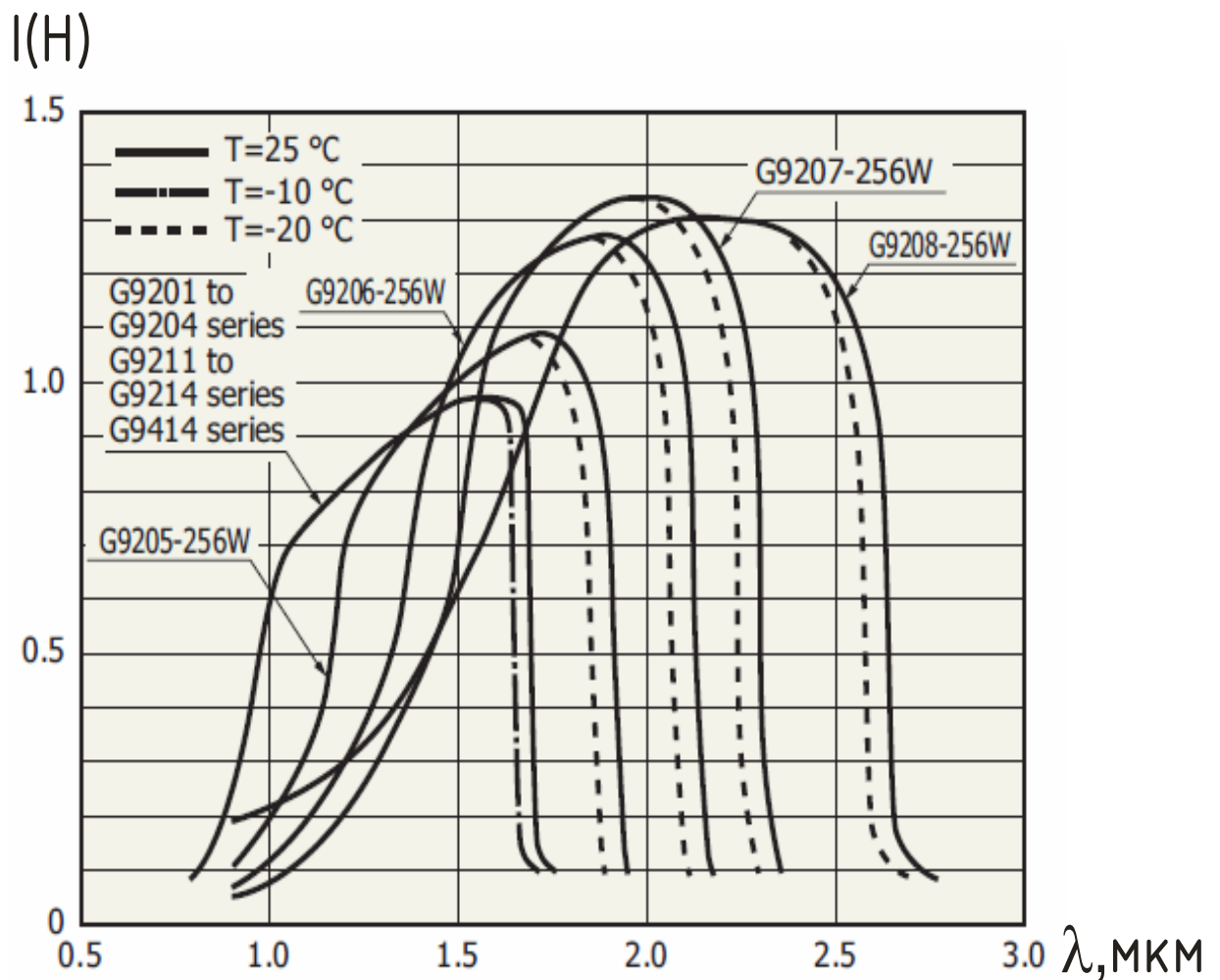


Рисунок 4.2 - Спектральні характеристики лінійних перетворювачів.

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

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

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

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

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

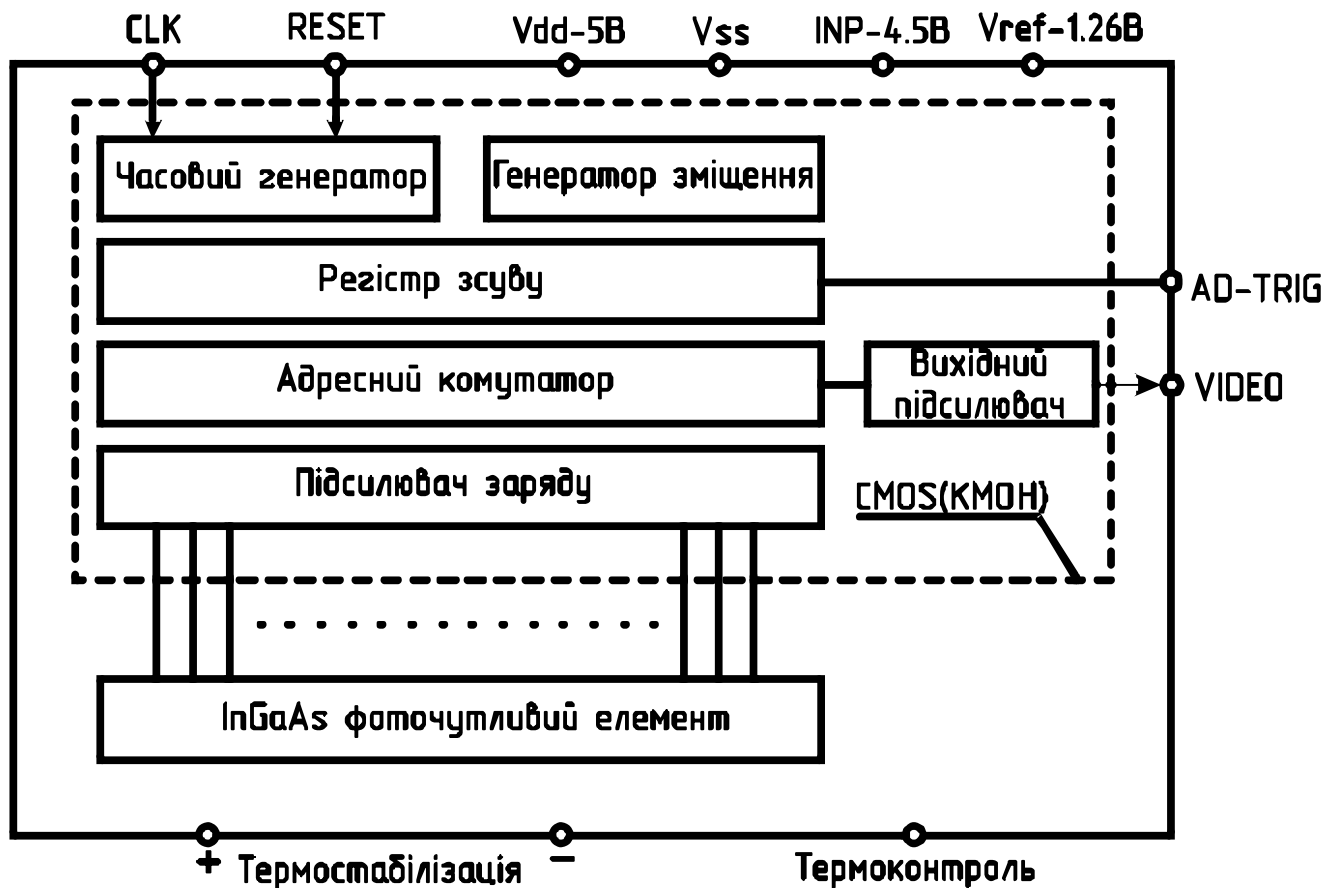


Рисунок 4.3 - Схема електрична структурна мікросхеми G9208.

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

Виводи лінійного перетворювача та їх призначення:

CLK – тактовий сигнал;

RESET – скид і час інтегрування;

Vdd – напруга живлення мікросхеми (5В);

Vss – земля;

INP – вхід напруги заряду лінійного перетворювача;

AD-TRIG – цифровий вихід для запуску АЦП;

Video – аналоговий вихід відеосигналу;

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

Таблиця 4.1. Параметри ПЗЗ.

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

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

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

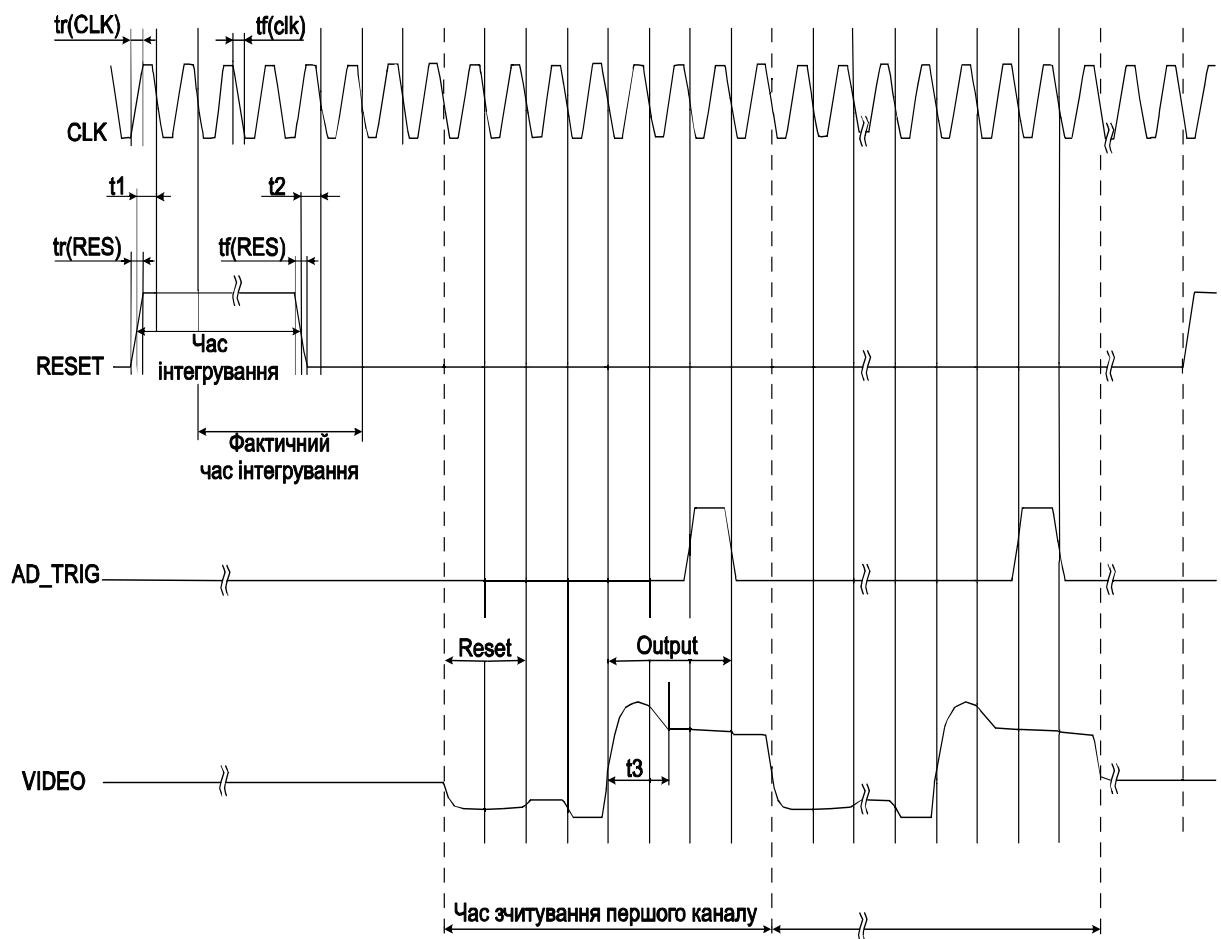
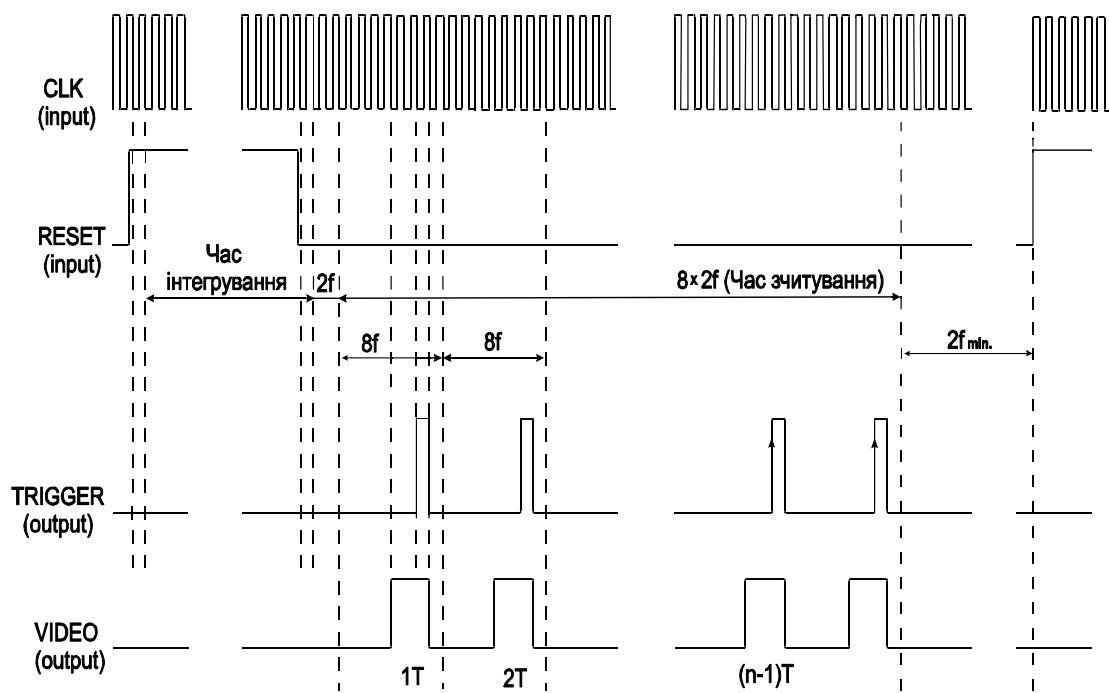


Рисунок 4.4 - Часова діаграма ПЗЗ лінійки.

### 4.3 Розробка блоку реєстрації та попередньої обробки інформації

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

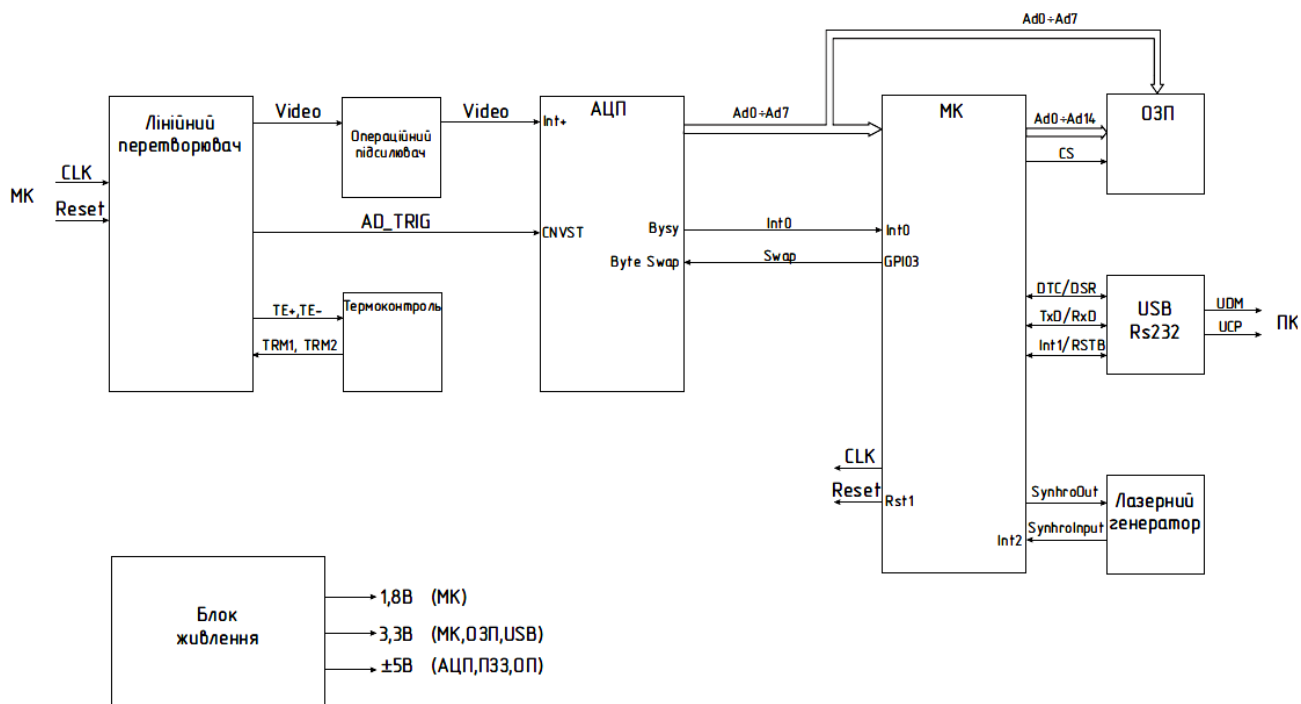


Рисунок 4.5 - Схема електрична функціональна блоку реєстрації попередньої обробки, та передачі інформації.

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

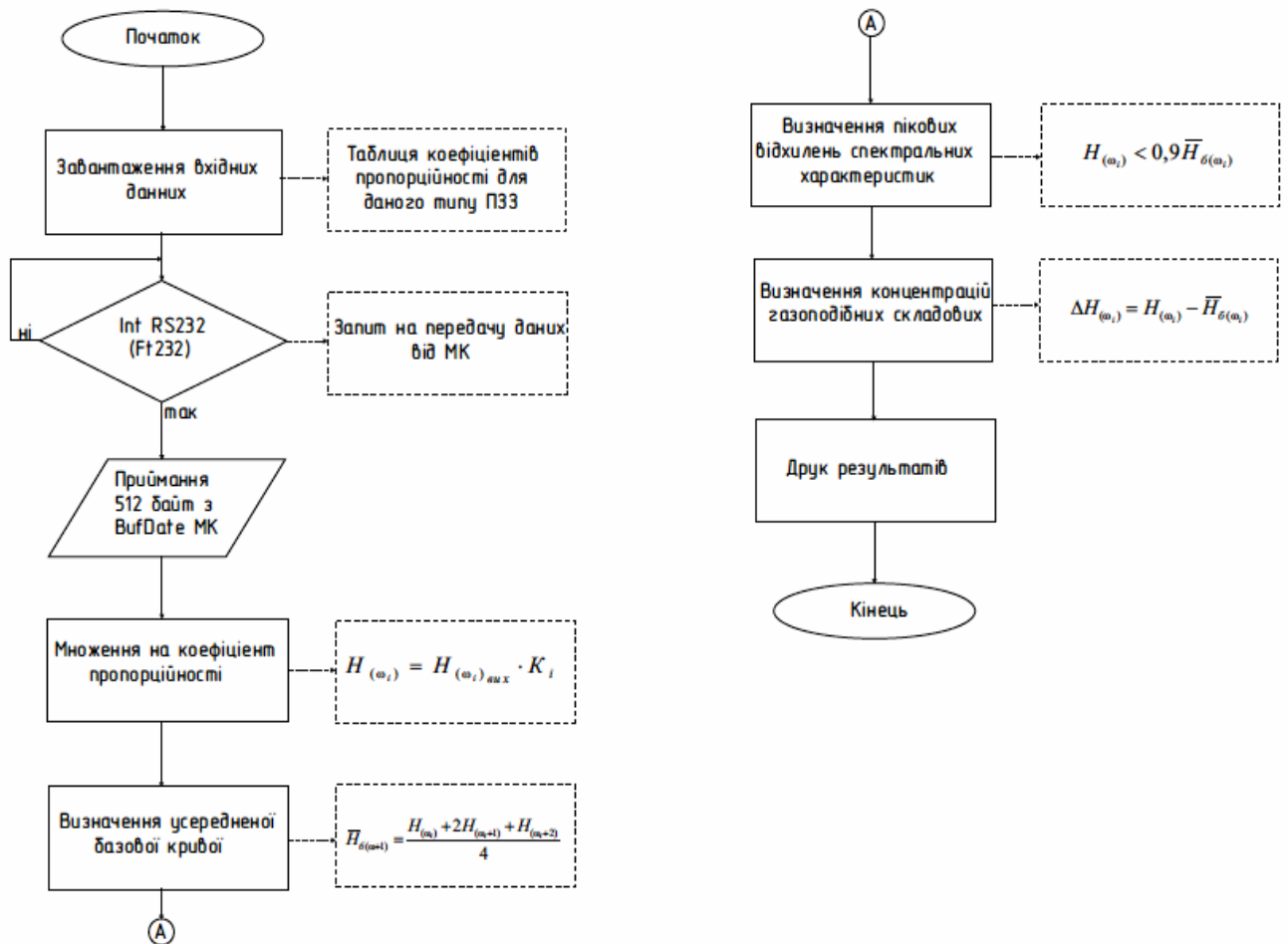


Рисунок 4.6 Алгоритм головної програми визначення вмісту зареєстрованих газових компонентів.

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

До складу блоку реєстрації, попередньої обробки та передачі даних рис.4.7 (MP-8.091401.11.0001.08.00.E3) входять: лінійний перетворювач типу G9208 (DA3); операційний підсилювач відеосигналів побудований на мікросхемах типу TS972ID (DA1:1÷DA6:2) та 74HCT00DB (DD1); стабілізатор температури ПЗЗ, який підключається через роз'єднувач X1; шістнадцятирозрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) типу DA4;

мікроконтролер (МК) типу S3F443FX (DA3), виконаний за архітектурою ARM7 з допоміжними мікросхемами: тактовий генератор на 64 МГц типу TCO-708X1A (GT1), мікросхеми скидання MC33164P-3 (DA8) та інвертори тактових сигналів DD4 типу 74HCT00DB; роз'єднувач X3 призначений для синхронізації роботи лазерного генератора та лінійного перетворювача; мікросхема FT232 (DD9) призначена для передачі даних від мікроконтролера до ПК через USB – порт (X5), роз'єднувач X4 забезпечує подачу напруги  $\pm 12\text{В}$  постійного струму; двох джерел опорної напруги DA5, DA7, які за допомогою трьох підсилювачів DA2:2, DA6:1, DA6:2 формують напругу 1,26В та 4,5В для лінійного перетворювача та АЦП. Блок живлення забезпечує подачу напруги +5В на регулятори опорних напруг DA5, DA7, на мікроконтролер, USB – інтерфейс, а також напругу -5В для роботи операційних підсилювачів.

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

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

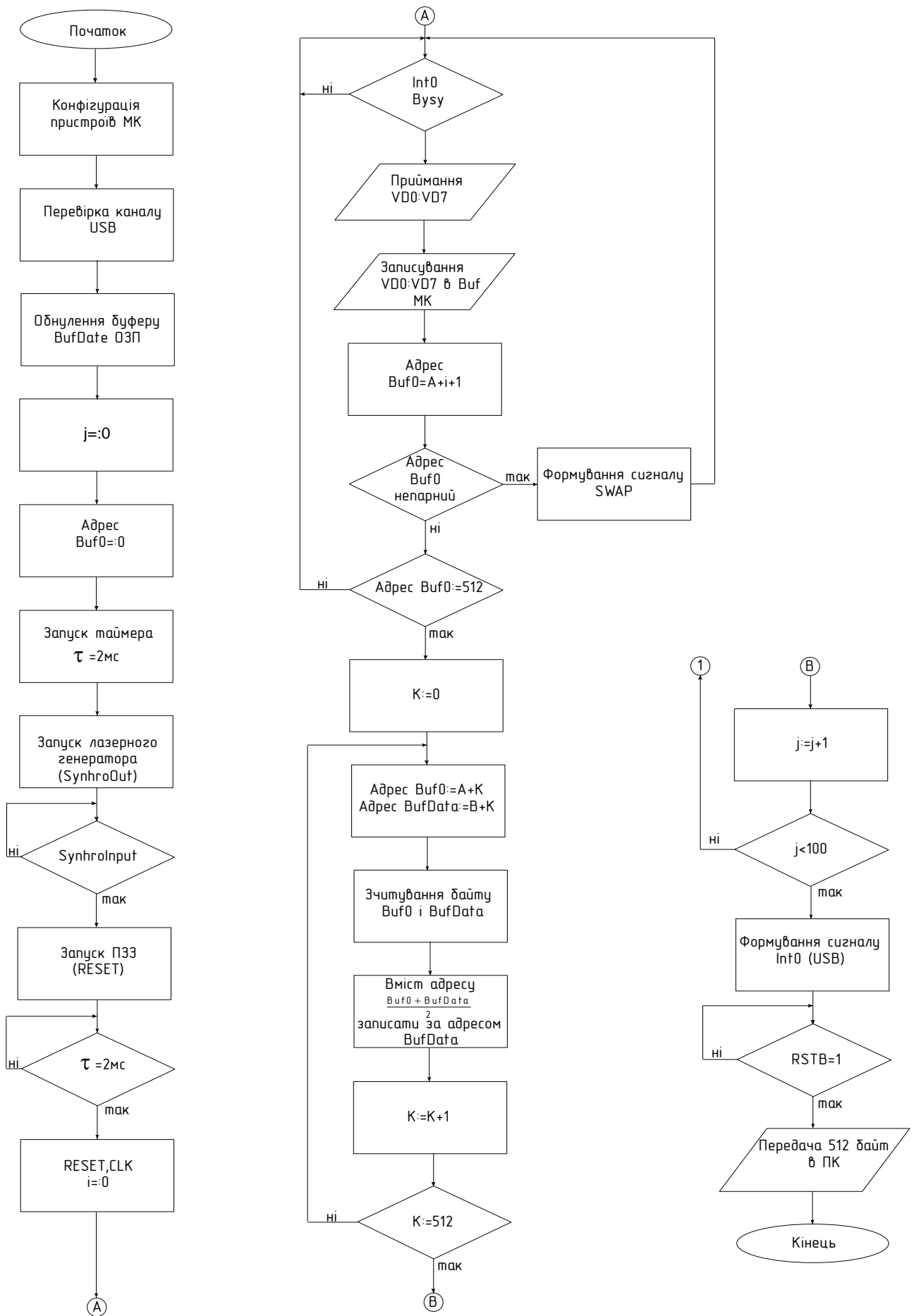


Рисунок 4.7 - Алгоритм роботи головної програми мікроконтролера.

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

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

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

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

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

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

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

де:  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

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

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

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

Програма визначає необхідні значення після чого розраховується фактична амплітуда відхилення

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

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

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

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

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

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

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

по всім пікселям лінійного перетворювача.

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

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

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

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

## 5. РОЗРАХУНОК НА НАДІЙНІСТЬ

Під надійністю технічних елементів та систем розуміють їх здатність виконувати задані функції та зберігати експлуатаційні параметри у встановлених межах протягом певного часу, за умови дотримання визначених правил експлуатації, технічного обслуговування, ремонту, зберігання та транспортування. Питання надійності стає особливо актуальним у зв'язку з інтенсифікацією виробництва, ускладненням електронних систем і режимів їх роботи, підвищенням вимог до якості та зростанням відповідальності автоматизованих систем.

Надійність визначається такими основними властивостями, як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та зберігання.

- Безвідмовність — здатність пристрою працювати без перерв і відмов протягом визначеного часу.
- Довговічність — здатність пристрою зберігати працездатність до досягнення граничного стану, при цьому враховується проведення планових перерв на технічне обслуговування і ремонт. Кількісно виражається напрацюванням — обсягом виконаної роботи або часом експлуатації до встановленої межі.
- Ремонтпридатність — здатність пристрою забезпечувати можливість швидкого виявлення причин відмов і їх усунення шляхом обслуговування та ремонту.
- Придатність до зберігання — властивість виробу зберігати працездатність у період зберігання і транспортування.

Таким чином, технічний ресурс — це сумарне напрацювання пристрою від початку експлуатації або після ремонту (середнього чи капітального) до моменту досягнення граничного стану. Строк служби визначається календарним періодом експлуатації до появи ознак граничного стану.

Інші показники надійності будуть розглянуті далі в цьому розділі. Основна мета проведення розрахунку надійності апаратури автоматики — оцінка

працездатності її елементів та розроблення рекомендацій щодо створення високонадійних електронних схем.

В практиці досліджень надійності, розрахунки базуються на експоненціальному законі теорії ймовірності

$$P(t)=\exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau\right] \quad (5.1)$$

де  $P(t)$  – інтегральна функція розподілення ймовірності безвідмовної роботи;  
 $\lambda(\tau)$  - відома інтенсивність відмов елементів, яка в загальному випадку являється функцією часу.

Враховуючи надзвичайно складні механізми відмов, з нормального часу використання елементу виключаються всі ранні відмови( систематичні відмови) і враховуються лише випадкові і відмови в період нормальної експлуатації.

Виходячи з цього, інтенсивність відмов  $\lambda(\tau)$  визначається на основі збору статистичних даних, причому її точність зростає з збільшенням кількості дослідних елементів.

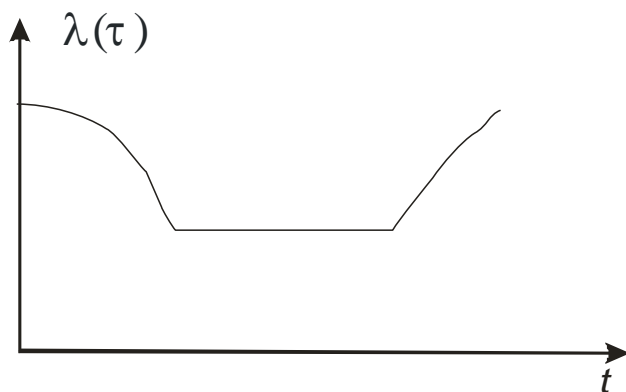


Рисунок 5.1 - Залежність  $\lambda$  від часу.

Графік (рис.5.1) ілюструє залежність інтенсивності відмов від часу роботи елементів, розбиту на три етапи.

I – етап припрацювання;

II – етап нормальної роботи;

III – етап зносу і старіння.

Виходячи з вищесказаного, можна вважати величину  $\lambda(\tau)$  постійною, підставляючи в залежність значення  $\lambda = const$ . При цьому отримаємо спрощене експлуатаційне рівняння

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \quad (5.2)$$

Знаючи ймовірність безвідмовної роботи, є можливість вирахування ймовірності відмов  $G(t)$  приладу, яка пов'язана з ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$  виразом

$$P(t) = 1 - G(t) \quad (5.3)$$

Ці величини є протилежними одна до одної і можуть змінюватися від 0 до 1.

Враховуючи вплив навколишнього середовища на збільшення інтенсивності  $\lambda(\tau)$  відмов, визначеної в лабораторних умовах, вводиться коефіцієнт  $k$ . Він в свою чергу враховує виконання деталей ( $k_i$ ), матеріал виготовлення ( $k_m$ ), завантаження елементів приладу ( $k_3$ ) і пов'язані з цим величини виразом (5.4)

$$k = k_i k_m k_3 \quad (5.4)$$

При наближених розрахунках їх розраховувати необов'язково. Тоді коефіцієнт впливу становить:

- для лабораторних пристроїв -1;
- для стаціонарних наземних пристроїв – 10...15;
- для мобільних агрегатів – 25...30;
- для залізничної апаратури – 40;
- для виробів промислової електроніки – 60;
- для бортової апаратури літаків – 100...150;
- для ракетної електроніки – 1000...1400.

Для системи інтенсивність відмов являється величиною, повністю характеризуючи її, становить:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i k_i \quad (5.5)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність відмов  $i$ -го елемента системи;

$k_i$  – коефіцієнт впливу на систему;

$n_i$  – загальне число елементів в одній їх категорії.

Так як  $k_i = \text{const}$ ? то (5.5) може бути переписаний

$$\lambda_c = k \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i \quad (5.5a)$$

Тоді рівняння 5.2 для системи можна переписати

$$P(t) = e^{-\lambda_c t} = e^{-kt \sum \lambda_i n_i} \quad (5.6)$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи залежить від надійності всіх вхідних елементів, від структурної схеми її з'єднань і степені резервування. До типових схем з'єднання (структурної надійності) відносять послідовне, паралельне і змішане поєднання елементів.

При послідовному з'єднанні  $n$ -елементів ймовірність безвідмовної роботи системи визначається (в відповідності з теорією про сумісне виконання незалежних дій) добутком

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (5.7)$$

В випадку паралельного з'єднання  $m$ -елементів ймовірність безвідмовної роботи знаходиться як

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)] \quad (5.8)$$

Коли з'єднання змішане, ( $n$ – послідовних груп з  $m$ - паралельних елементів) ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = \prod_{i=1}^n [1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)]] \quad (5.9)$$

При цьому ми можемо визначити час напрацювання на відмову приладу, за яким визначається гарантійна межа розробки. Він є обернено пропорційний до інтенсивності відмов і становить

$$T = 1/\lambda_c = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_c t} dt \quad (5.10)$$

Розрахуємо надійність, газоаналізатора, вважаючи при цьому для спрощення, що елементи з'єднані послідовно. Інтенсивність відмов кожної

радіодеталі береться з довідникових матеріалів. Для елементів принципової схеми, ці дані приведені в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 - Інтенсивності відмов елементів

Елементи	Кількість	$\lambda t$ , 1/год
<i>Конденсатори:</i>		
Електроліти		
Фольга	29	$2 \cdot 10^{-6}$
<i>Резистори</i>	22	$4 \cdot 10^{-7}$
Плівкові		
Змінні композитні	24	$24 \cdot 10^{-8}$
<i>Діоди</i>	7	$7 \cdot 10^{-6}$
Кремeneві		
Германієві	13	$5 \cdot 10^{-8}$
Великі інтегральні мікросхеми (цифрові)	4	$8 \cdot 10^{-7}$
Мікросхеми малої інтеграції	5	$1 \cdot 10^{-7}$
Інтегральні мікросхеми (лінійні)	4	$5 \cdot 10^{-7}$
Трансформатор	6	$4 \cdot 10^{-7}$
Роз'єми	1	$2 \cdot 10^{-7}$
Перемикачі кнопочові	3	$6 \cdot 10^{-6}$
Проводи	2	$7 \cdot 10^{-7}$
Запобіжник	59	$15 \cdot 10^{-9}$
Пайка	1	$5 \cdot 10^{-8}$
	513	$1 \cdot 10^{-10}$

За формулою (5.5) розрахуємо системну інтенсивність відмов, враховуючи дані з таблиці 5.1

$$\lambda_c(t) = 10 [(2 \cdot 10^{-6}) \cdot 29 + (4 \cdot 10^{-7}) \cdot 22 + (2 \cdot 10^{-8}) \cdot 24 + (2 \cdot 10^{-6}) \cdot 7 + (5 \cdot 10^{-8}) \cdot 13 + (8 \cdot 10^{-7}) \cdot 5 + (1 \cdot 10^{-7}) \cdot 4 + (5 \cdot 10^{-7}) \cdot 4 + (4 \cdot 10^{-7}) \cdot 6 + (2 \cdot 10^{-7}) \cdot 1 + (6 \cdot 10^{-6}) \cdot 3 + (7 \cdot 10^{-7}) \cdot 2 + (15 \cdot 10^{-6}) \cdot 59 + (5 \cdot 10^{-8}) \cdot 1 + (1 \cdot 10^{-9}) \cdot 513] = 0,000023(1/год)$$

Знаючи  $\lambda_c(t)$ , визначимо інтенсивність і ймовірності безвідмовної роботи газоаналізатора на протязі 1000 годин.

$$P_1(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 1000} = 0,79$$

$$P_2(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 900} = 0,81$$

$$P_3(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 800} = 0,83$$

$$P_4(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 700} = 0,85$$

$$P_5(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 600} = 0,87$$

$$P_6(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 500} = 0,89$$

$$P_7(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 400} = 0,91$$

$$P_8(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 300} = 0,93$$

$$P_9(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 200} = 0,95$$

$$P_{10}(t) = e^{-10 \cdot 0,000023 \cdot 100} = 0,97$$

$$P_{11}(t) = e^{-10 \cdot 0,000023} = 1$$

За даними ймовірностей відмов на часових відрізках можна визначити ймовірність відмов на тих самих часових інтервалах

$$G_1(t) = 1 - 0,79 = 0,21$$

$$G_2(t) = 1 - 0,81 = 0,19$$

$$G_3(t) = 1 - 0,83 = 0,17$$

$$G_4(t) = 1 - 0,85 = 0,15$$

$$G_5(t) = 1 - 0,87 = 0,13$$

$$G_6(t) = 1 - 0,89 = 0,11$$

$$G_7(t) = 1 - 0,91 = 0,09$$

$$G_8(t) = 1 - 0,93 = 0,07$$

$$G_9(t) = 1 - 0,95 = 0,05$$

$$G_{10}(t) = 1 - 0,97 = 0,02$$

$$G_{11}(t) = 1 - 1 = 0$$

За цими розрахунками побудований графік залежностей  $P = f(t)$  і  $G = f(t)$  на аркуші .

Визначаємо час напрацювання на відмову за виразом(5.10)

$$T = \int_0^{10000} e^{-0,000023 \cdot 100000 \cdot 10} \approx 43478,26 \text{ (год.)}$$

Це приблизно дорівнює 5 років напрацювання на відмову(межі інтегрування взяті довільно).

Таким чином, прилад може отримати гарантію виробника 4 роки, що є хорошим результатом для промислової установки.

## ВИСНОВКИ

Дана магістерська робота була присвячена аналізу сучасного стану технології переробки соку в період сатурації у виробництві цукру-піску та розробці на цій основі комп'ютеризованої системи контролю процесу.

Проведений патентний пошук підтвердив унікальність розробленого приладу, принаймні на пострадянському просторі. Запропонована система дозволяє інтегрувати контроль сатурації в сучасні комп'ютеризовані системи виробництва цукру-піску.

Ключовим елементом роботи є запропонований новий метод аналізу сатураційного газу, вперше застосований у промислових газоаналізуючих установках. Головна перевага цього методу — використання надійного та високоточного тонкоплівкового напівпровідникового датчика, що забезпечує підвищення точності результатів на 5-10% порівняно з аналогічними пристроями.

У процесі виконання роботи було розроблено:

- структурну схему системи контролю;
- принципову електричну схему блоку обробки вхідних аналогових сигналів і передачі цифрових даних до ПК;
- схеми блоку реєстрації параметрів контролю;
- функціональну та електричну принципові схеми системи контролю.

В якості керуючої мікроЕОМ було обрано однокристальний мікроконтролер ATTINY44-20PU фірми Atmel із вбудованим АЦП. Також були виконані розрахунки на надійність системи в цілому.

Крім того, в роботі наведено математичне підґрунтя фізичного процесу дослідження складу газових сумішей, розглянуто заходи з охорони праці та проведено техніко-економічні розрахунки.

Практична цінність результатів магістерської роботи полягає в можливості їхнього використання для створення комп'ютеризованої системи контролю процесу переробки соку у виробництві цукру-піску.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологія цукру (у 3 т.) / [А. А. Ліпец та ін.]; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця. (Підручник) Київ: Експрес-об'ява, 2015 р.
2. Автоматизація технологічних процесів у цукровому виробництві / Н. В. Ковтун. (Навчальний посібник) Київ: НУХТ, 2014 р.
3. Процеси та апарати харчових виробництв. Виробництво цукру / П. П. Яворська, О. Р. Яворський. (Навчальний посібник) Львів: ЛНАУ, 2019 р.
4. Аналіз сучасного стану технології сатурації цукрового виробництва / І. А. Осадча, В. А. Штангєєв, О. М. Царук. (Стаття) Збірник наукових праць НУХТ, № 46, 2020 р.
5. Розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом сатурації бурякового соку / О. В. Кузнєцов. (Дисертація канд. техн. наук) Київ: НУХТ, 2018 р.
6. Математичне моделювання та автоматизація теплотехнологічних процесів цукрового виробництва / В. М. Логвін, Ю. О. Зайцев. (Монографія) Вінниця: ВНТУ, 2017 р.
7. Вимірювання та контроль технологічних параметрів у цукровому виробництві / В. В. Поліщук, І. В. Коваль. (Навчальний посібник) Вінниця: ВНТУ, 2016 р.
8. Оптимізація режиму I сатурації в цукровому виробництві / В. П. Марценюк, А. І. Українець. (Стаття) Наукові праці НУХТ, № 2, 2019
9. Васильєв В. П. Аналітична хімія. В 2 кн. Кн. 2. Фізико-хімічні методи аналізу: Учеб. для студ. вузів, що навчаються по хіміко-технол. спец. - 2-і изд., перераб. і доп. - М.:Дрохва, 2002. - 384 с., іл. - с. 191.
10. Кнорре Д. Г., Крилова Л. Ф., Музикантів В. С. Фізична хімія: Учеб. посібник для вузів. - М.: Высш. школа, 1981. - 328 с., іл., с. 263-264.
11. Коростелев П. П. Лабораторна техніка хімічного аналізу. - Під ред. докт. хім. наук А. И. Бусеева, - М.: Хімія, 1981. - 312 с., іл., с. 226-232.

12. Посібник з хімічного аналізу поверхневих вод суши. Під ред. буд. х.н. проф. А. Д. Семенова. Л.: Гидрометеоиздат, 1977., с. 31-36.
13. Фомін Г. С. Вода. Контроль хімічної, бактеріальної й радіаційної безпеки за міжнародними стандартами. Енциклопедичний довідник. - 2-і изд. перераб. і доп. - М.: Видавництво "Протектор", 1995. - 624 с., іл., с. 95-96.
14. Миценко І.М., Мезенцева О.М. Цивільна оборона , Чернівці: "Книги – XXI", 2004р.
15. Депутат О.П., Коваленко І.В., Мужик І.С. Цивільна оборона , Львів: "Афіша", 2001р.
16. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
17. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
18. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
19. Конституція України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 29.10.2023).
20. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 23.11.2023).
21. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 15.11.2023).
22. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 11.11.2023).
23. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 19.10.2023).

24. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 19.10.2023).

25. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 20.10.2023).

26. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 26.10.2023).

27. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

28. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Від 25.07.2006. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення: 01.12.2023).

