

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем

БОГДАНОВИЧ Станіслав Андрійович

Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості промислової
котельні / Information and measurement system for controlling the gasification of
an industrial boiler house

Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи МТІР-41

С.А. Богданович

Науковий керівник

к.т.н., доцент І.Б. Албанський

Кваліфікаційну роботу допущено

до захисту:

«_____» _____ 2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І. Сегін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
"____" _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

БОГДАНОВИЧУ Станіславу Андрійовичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості промислової котельні / Information and measurement system for controlling the gasification of an industrial boiler house.

Керівник роботи: к.т.н., доцент Албанський І.Б.

затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025 р. № 894.

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи: 25.05.2026р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Особливості побудови інформаційно-вимірювальних систем контролю загазованості приміщень промислової котельні.

2. Способи та обладнання вимірювання концентрацій шкідливих газів.

3. Технічні засоби автоматизації об'єкта управління.

4. Розрахунок кількісних похибок вимірювальних параметрів газоаналізатора інформаційно-вимірювальної системи.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз обладнання та алгоритмів роботи інформаційно-вимірювальних систем.

2. Розробити структурну і функціональну схеми інформаційно-вимірювальної системи загазованості.

3. Розробка алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної газоаналізуючої системи промислової котельні.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна та функціональна схеми інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості котельної установки.

2. Структура алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної газоаналізуючої системи.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Албанський І.Б.		
2	Албанський І.Б.		
3	Албанський І.Б.		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз обладнання та алгоритмів роботи інформаційно-вимірювальних систем	12.2025р. – 01.2026р.	
2	Проектування інформаційно-вимірювальної системи загазованості промислової котельні	02.2026р. – 03.2026р.	
3	Розрахунок системи автоматичного регулювання та визначення кількісних похибок вимірювальних параметрів газоаналізатора	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

(підпис)

Богданович С.А.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доцент Албанський І.Б.

АНОТАЦІЯ

Богданович С.А. Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості промислової котельні. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі досліджено інформаційно-вимірювальні системи контролю загазованості, тобто системи основне завдання яких контроль концентрації шкідливих газів та діагностика газоаналізуючого обладнання на випадок аварійних ситуацій, визначено функціональні, структурні та архітектурні особливості систем, що забезпечують нормальні умови роботи обслуговуючого персоналу котельні, проаналізовано технічну базу та обґрунтовано вибір засобів реалізації запропонованої системи. Розроблено структуру та функціональну схеми, а також розраховано кількісні похибки вимірювальних параметрів газоаналізатора інформаційно-вимірювальної системи, проведений синтез системи автоматичного регулювання загазованості приміщень промислової котельні.

ABSTRACT

Bogdanovich S.A. Information and measurement system for controlling the gasification of an industrial boiler house. - Manuscript.

Research for the degree of Bachelor in specialty 152 Metrology and information and measuring technology, educational and professional program – Internet of Things Technologies, Western Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work investigates information and measuring systems for gas pollution control, i.e. systems whose main task is to control the concentration of harmful gases and diagnose gas-analyzing equipment in case of emergency situations, determines the functional, structural and architectural features of the systems that ensure normal working conditions for boiler room service personnel, analyzes the technical base and justifies the choice of means of implementing the proposed system. The structure and functional scheme are developed, and the quantitative errors of the measuring parameters of the gas analyzer of the information and measuring system are calculated, and a synthesis of the system for automatic gas pollution control of industrial boiler room premises is carried out.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ТА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ	8
1.1 Інформаційно-вимірювальна система як складова автоматизованої системи управління об'єктом	8
1.2 Основні принципи та методи роботи газоаналізуючого обладнання	13
1.3 Методи вимірювання основних параметрів загазованості та етапи калібрування газоаналізаторів	19
2. ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗАГАЗОВАНOSTІ ПРОМИСЛОВОЇ КОТЕЛЬНОЇ	31
2.1 Розробка структурної та функціональної схеми комплексу технічних засобів інформаційно-вимірювальної системи	31
2.2 Розробка алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної газоаналізуючої системи	37
2.3 Обґрунтування вибору засобів автоматизації для проектування інформаційно-вимірювальної системи	43
3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОАНАЛІЗАТОРА	54
3.1 Синтез системи автоматичного регулювання загазованості приміщень промислової котельні	54
3.2 Розрахунок кількісних похибок вимірювальних параметрів газоаналізатора інформаційно-вимірювальної системи	64
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Богданович С.А.			Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості промислової котельні/Information and measurement system for controlling the gasification of an industrial boiler house	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Албанський І.Б.					4	78
Консульт.		Албанський І.Б.				ЗУНУ.ФКІТ.МТІР-41		
Н. Контр.		Заставний О.М.						
Затверд.		Сегін А.І.						

ВСТУП

Актуальність теми. Промислова котельня є складним технологічним об'єктом, де одночасно працюють газопроводи, пальникові пристрої, запірна арматура, вентиляційне обладнання, системи автоматики та засоби електроживлення. Порушення герметичності газових комунікацій, несправність пальників, недостатня вентиляція або помилки персоналу можуть призвести до накопичення вибухонебезпечних концентрацій газу в приміщенні. Це створює реальну загрозу вибуху, пожежі, отруєння персоналу чадним газом та зупинки технологічного процесу.

Особливу небезпеку становлять метан, пропан-бутан, чадний газ, сірководень і зниження концентрації кисню. Метан і пропан-бутан є вибухонебезпечними газами, які при досягненні певної концентрації у повітрі можуть утворювати вибухонебезпечну суміш. Чадний газ є токсичним і небезпечним тим, що не має кольору та запаху, тому його наявність неможливо своєчасно визначити без спеціальних технічних засобів. Саме тому застосування автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості є необхідною умовою безпечної експлуатації промислової котельні.

Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості забезпечує безперервний моніторинг стану повітряного середовища, вимірювання концентрації небезпечних газів, формування попереджувальних та аварійних сигналів, автоматичне керування вентиляцією, перекриття подачі газу та передачу інформації до диспетчерського пункту. Завдяки цьому зменшується вплив людського фактора, підвищується швидкість реагування на аварійні ситуації та забезпечується захист персоналу і технологічного обладнання.

Важливість розробки такої системи також пов'язана з необхідністю впровадження сучасних засобів автоматизації, програмованих логічних контролерів, промислових газоаналізаторів, SCADA-систем та надійних

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

каналів передачі даних. Це дозволяє не лише виявляти небезпечні концентрації газів, але й архівувати параметри, вести журнал аварійних подій, здійснювати дистанційний контроль і аналізувати роботу котельної установки.

Таким чином, дана тема є актуальною, оскільки спрямована на підвищення рівня промислової безпеки, зниження ризику аварій, забезпечення безперервного контролю загазованості та удосконалення систем автоматизації промислових котелень. Розробка інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості дозволяє забезпечити своєчасне виявлення небезпечних ситуацій, оперативне аварійне реагування та надійну експлуатацію котельного обладнання.

Мета кваліфікаційної роботи. Актуалізація розробки інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості промислової котельні. У представлений кваліфікаційній роботі проаналізовано аналогічні та сумісні автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи керування та наведено структуру і способи включення засобів автоматизації контролю концентрацій шкідливих газів. Пріоритетними задачами розробки інформаційно-вимірювальної системи загазованості з використанням інтегрованих програмно-технічних засобів та промислових програмовано-логічних контролерів, що є на сьогоднішній день невід'ємним елементом для автоматизованих систем різного ступеня складності.

Основними задачами кваліфікаційної роботи є:

- аналіз обладнання та алгоритмів роботи інформаційно-вимірювальних систем, та пристроїв і засобів їх автоматизації;
- розробка структурної та функціональної схем комплексу технічних засобів та пристроїв входять до загальної схеми інформаційно-вимірювальної системи;
- розробка алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної газоаналізуючої системи;
- обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації;

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- синтез системи автоматичного регулювання загазованості приміщень котельні;

- розрахунок кількісних похибок вимірювальних параметрів газоаналізаторів.

Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості приміщень промислової котельні є актуальною розробкою та вирішує ряд нагальних задач захисту та попередженню аварійних ситуацій для обслуговуючого персоналу та технологічних процесів виробництва. Пошук рішень проблемних задач такого типу є поєднання сучасних програмно-технічних засобів автоматизації з принципово новими алгоритмами та математичними методами у промисловості.

Предметом дослідження є інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості приміщень котельні.

Об'єктом дослідження є вимірювальні та обчислювальні процеси концентрації шкідливих та небезпечних газів та попередження можливих аварійних і вибухонебезпечних ситуацій на промисловому об'єкті.

Методи дослідження – аналіз та огляд актуальних електронних ресурсів і літературних джерел, порівняльний аналіз конкуренто спроможних розробок в галузі інформаційно-вимірювальних систем.

Практичне значення одержаних результатів. Базується на тому, що запропоновані методи та технічні рішення по проектуванні та розрахунку інформаційно-вимірювальних систем, які мають практичні можливості підвищити їх надійність та ефективність в рази.

Апробація. Іванчишина Д., Богданович С., Підгребля Р., Процюк А. Особливості функціонування автоматизованих систем безпеки на основі газоаналізаторів у складі промислового устаткування / Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. С.159-164.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ТА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

1.1 Інформаційно-вимірjuвальна система як складова автоматизованої системи управління об'єктом

У сучасних автоматизованих системах управління технологічними об'єктами особливе місце займають інформаційно-вимірjuвальні системи (ІВС). Саме вони забезпечують отримання, обробку, передачу та зберігання інформації про стан технологічного процесу, параметри обладнання та зовнішні впливи. З точки зору теорії автоматичного управління (ТАУ), інформаційно-вимірjuвальна система є невід'ємною складовою контуру автоматичного керування, оскільки формує інформаційну базу для прийняття рішень регуляторами та керуючими пристроями.

ІВС являє собою сукупність технічних засобів, програмного забезпечення та алгоритмів, призначених для автоматичного вимірjuвання фізичних величин, їх перетворення у зручний для обробки вигляд, передачі інформації до систем керування та подальшого аналізу. Основним призначенням інформаційно-вимірjuвальної системи є забезпечення достовірного, безперервного та оперативного контролю параметрів об'єкта управління.

У загальному випадку ІВС входить до складу автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) та виконує наступні функції:

- збору інформації;
- первинного перетворення сигналів;
- фільтрації та нормалізації даних;
- передачі вимірjuвальної інформації;
- архівування параметрів;
- діагностики стану обладнання;
- формування сигналів для систем регулювання та диспетчеризації.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З позиції ТАУ інформаційно-вимірювальна система є джерелом зворотного зв'язку у замкнутій системі автоматичного керування [1]. Без достовірної вимірювальної інформації система не здатна забезпечити стабільність, точність та якість регулювання.

Місце інформаційно-вимірювальної системи у загальній структурі АСУ є ключовим з точки зору збору обробки даних і прийняття рішень, тобто ієрархічно розгалужене розміщення. Типова автоматизована система управління складається з таких основних підсистем, як: об'єкт управління; інформаційно-вимірювальна система; система автоматичного регулювання; виконавчі механізми; система диспетчеризації та візуалізації; підсистема зберігання даних. Структурно ІВС розташовується між об'єктом керування та регулятором. Загальна структура АСУ з ІВС представлена на рисунку 1.1.

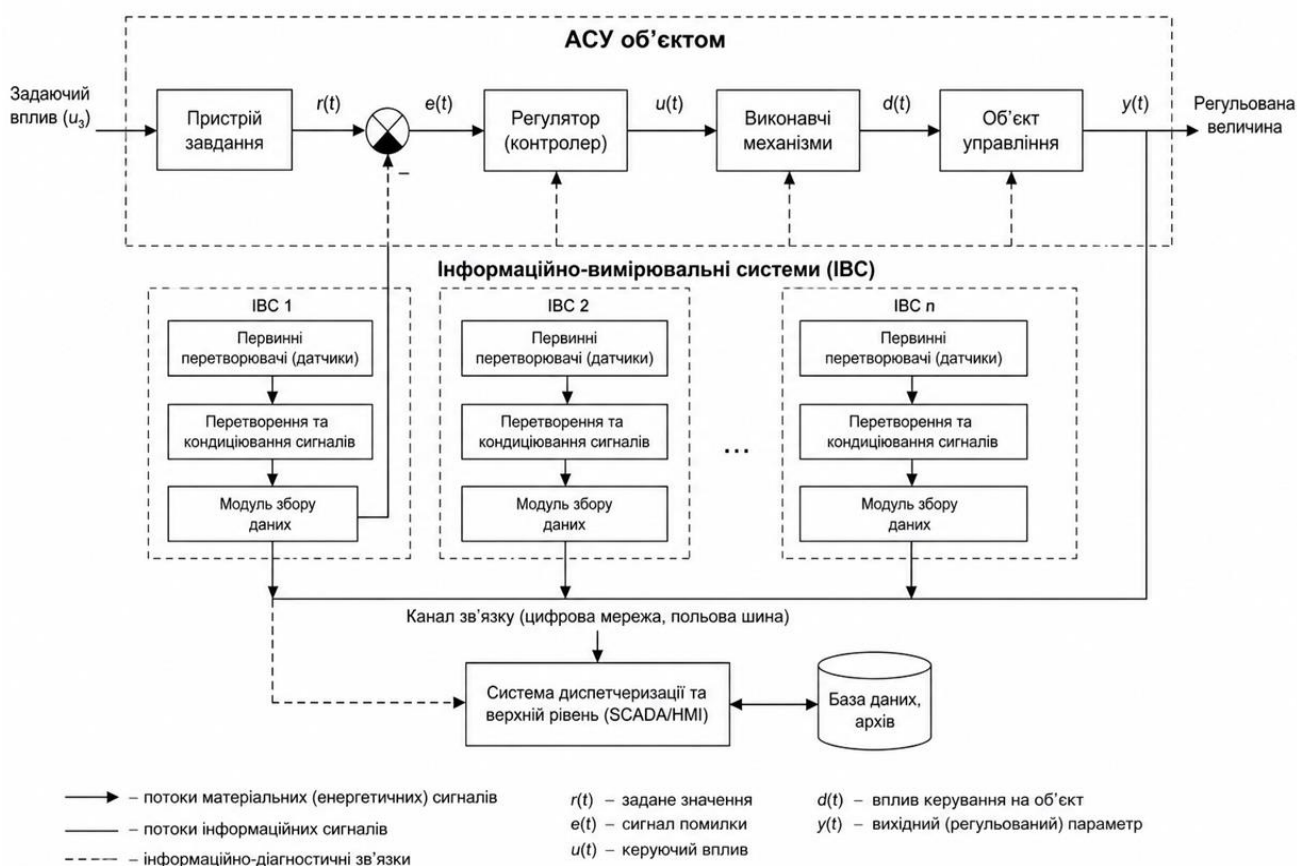


Рисунок 1.1 – Загальна структура АСУ з ІВС та їх взаємодія

У такій структурі ІВС виконує функцію інформаційного посередника між фізичним об'єктом та системою керування. Основними елементами

інформаційно-вимірювальної системи є декілька функціонально пов'язаних компонентів.

Первинні вимірювальні перетворювачі (сенсори). Сенсори призначені для перетворення фізичних величин у електричні сигнали. Вони є основним джерелом інформації про стан технологічного процесу. У системах автоматизації використовуються: сенсори температури; сенсори тиску; сенсори вологості; сенсори освітленості; сенсори рівня; витратоміри; струмові та напругові трансформатори; газоаналізатори; сенсори руху та присутності.

Для прикладу у інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) контролю загазованості у промисловій котельні застосовується комплекс сенсорів, призначених для безперервного моніторингу вибухонебезпечних, токсичних та супутніх газів, а також параметрів повітряного середовища. Вибір сенсорів залежить від типу палива, технологічного процесу та вимог промислової безпеки.

Сигнали з сенсорів часто мають малу амплітуду або нестандартний формат. Тому перед передачею даних до контролера вони проходять: підсилення; фільтрацію; гальванічну розв'язку; аналого-цифрове перетворення. Найпоширеніші стандартизовані сигнали - 0–10 В, 4–20 мА, RS-485, Modbus RTU, CAN, Ethernet. Модулі збору даних виконують:

- опитування сенсорів;
- цифрову обробку сигналів;
- передачу даних до ПЛК або SCADA-системи.

У сучасних системах часто використовуються найпопулярніші моделі провідних світових розробників, а саме [2]:

- Siemens ET200;
- Schneider Electric TM3;
- Advantech ADAM;
- WAGO I/O System.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Контролер є центральним елементом обробки інформації, його основні функції це: аналіз сигналів; реалізація алгоритмів керування; формування керуючих дій; діагностика аварій; обмін даними з верхнім рівнем АСУ.

У теорії автоматичного управління ІВС розглядається як елемент каналу зворотного зв'язку. Основна задача зворотного зв'язку полягає у порівнянні реального стану системи із заданими параметрами, що дозволяє визначити похибку і сформувати коригуючу дію. Точність функціонування всієї системи напрямку залежить від перш за все точності сенсорів, швидкодії ІВС, а також рівня шумів та затримок передачі інформації. З точки зору ТАУ інформаційно-вимірювальна система має власні динамічні параметри, а саме:

- інерційність;
- час затримки;
- похибку вимірювання;
- частотні характеристики;
- передавальну функцію.

Передавальна функція сенсора першого порядку має наступний вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{T_p + 1},$$

де k — коефіцієнт передачі; T — стала часу.

Наявність інерційності у вимірювальному каналі може погіршувати стійкість системи та якість перехідних процесів, що звичайно вплине на точність регулювання. Тому при синтезі АСУ обов'язково враховуються параметри ІВС. Робота ІВС відбувається у декілька етапів.

Початковий етап - вимірювання параметрів, сенсори фіксують фізичні величини, такі як: температуру; струм; освітленість; тиск; рівень напруги. Наступний етап - перетворення сигналу, а саме сигнал нормалізується та перетворюється у цифровий формат. В подальшому відбувається передача даних, інформація передається до ПЛК та SCADA, що у диспетчерському центрі. Обробка інформації у контролері - аналіз параметрів, виконання логічних операцій та формування команди управління. Останнім етапом є

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формування керуючої дії, тобто команди передаються на: реле; контактори; частотні перетворювачі; приводи; світильники.

Сучасні інформаційно-вимірювальні системи характеризуються:

- високою точністю;
- цифровими інтерфейсами;
- підтримкою IoT;
- віддаленим моніторингом;
- інтеграцією у Smart Building;
- використанням штучного інтелекту;
- самодіагностикою.

До основних переваг можна віднести:

- підвищення точності керування;
- зменшення впливу людського фактора;
- швидке виявлення аварій;
- автоматизація процесів;
- централізований моніторинг;
- підвищення енергоефективності;
- архівування даних;
- прогнозування несправностей.

Інформаційно-вимірювальна система є ключовою складовою будь-якої сучасної автоматизованої системи управління. Саме ІВС забезпечує формування достовірної інформації про стан технологічного об'єкта та реалізацію ефективного зворотного зв'язку, без якого неможливе стабільне функціонування автоматичних систем керування.

З точки зору ТАУ ІВС виступає елементом вимірювального каналу замкнутої системи та безпосередньо впливає на: точність регулювання; стійкість; швидкодію; якість перехідних процесів.

Сучасні тенденції розвитку автоматизації передбачають подальше удосконалення інформаційно-вимірювальних систем шляхом інтеграції

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цифрових технологій, бездротових мереж, хмарних платформ та інтелектуальних алгоритмів аналізу даних.

1.2 Основні принципи та методи роботи газоаналізуючого обладнання

Газоаналізуюче обладнання є важливою складовою сучасних автоматизованих систем контролю технологічних процесів, систем промислової безпеки, вентиляції, пожежного захисту та екологічного моніторингу. Основним призначенням таких систем є безперервний контроль концентрації небезпечних, токсичних, вибухонебезпечних або технологічних газів у повітряному середовищі.

Особливо важливим застосування газоаналізаторів є у:

- промислових котельнях;
- хімічних виробництвах;
- нафтогазових об'єктах;
- підземних спорудах;
- готельних та торгових комплексах;
- системах вентиляції;
- системах «розумний будинок»;
- об'єктах критичної інфраструктури.

Газоаналізуюче обладнання дозволяє: своєчасно виявляти витoki газу; запобігати вибухам; контролювати якість повітря; здійснювати контроль продуктів горіння; забезпечувати безпеку персоналу; автоматизувати процес аварійного реагування. Сучасні газоаналізатори інтегруються у SCADA-системи, PLC-контролери та інформаційно-вимірювальні системи (IBC), що дозволяє реалізувати централізований моніторинг і автоматичне керування аварійними процесами.

Принцип роботи газоаналізуючого обладнання базується на фізичних або хімічних властивостях газів. Сенсор реагує на зміну певного параметра

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середовища, після чого електронний блок виконує обробку сигналу та визначає концентрацію газу.

Основними методами газового аналізу є: електрохімічний; каталітичний; напівпровідниковий; інфрачервоний; фотоіонізаційний; термокондуктометричний; ультразвуковий; оптичний лазерний. Кожен метод має власні переваги, недоліки та область застосування.

Електрохімічні сенсори є одними з найпоширеніших у системах контролю токсичних газів (рисунок 1.2). Робота базується на виникненні електричного струму внаслідок хімічної реакції між газом та електродами сенсора. Конструктивно сенсор містить: робочий електрод; допоміжний електрод; електроліт; газопроникну мембрану. При проникненні газу через мембрану виникає електрохімічна реакція, величина струму якої пропорційна концентрації газу.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд електрохімічних сенсорів

Основними перевагами електрохімічних сенсорів є:

- висока точність;
- мала похибка;
- низьке енергоспоживання;
- хороша селективність;
- компактність.

До недоліків можна віднести обмежений термін служби, також чутливість до температури та вологості і відповідно необхідність калібрування. Гази, що контролюються електрохімічними сенсорами це: чадний газ CO; сірководень H_2S ; аміак NH_3 ; діоксид азоту NO_2 ; кисень O_2 .

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Прикладами промислових взірців електрохімічних сенсорів є вироби відомих світових брендів: Honeywell EC-FX-NH₃; Alphasense CO-B4; Membrapor H₂S/C-50. Газоаналізатори у свою чергу є більш складніші вироби і застосовуються на виробничих лінях автоматизованих систем керування. Прикладами таких газоаналізаторів є: Dräger Polytron 7000; MSA Safety ALTAIR 5X.

Каталітичні sensori використовуються переважно для контролю вибухонебезпечних газів (рисунок 1.3). Основний елемент — нагрітий каталітичний резистор. При потраплянні горючого газу відбувається реакція окиснення, що змінює температуру та електричний опір сенсора. Зміна опору пропорційна концентрації газу.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд каталітичних сенсорів

Контрольовані гази в середовищі яких працюють каталітичні sensori це є: метан CH₄; пропан; бутан; водень; пари бензину. Основними перевагами є: швидкодія; простота конструкції; надійність. Відповідно недоліками є: високе енергоспоживання; деградація каталізатора; чутливість до отруйних речовин.

Прикладами промислових взірці каталітичних сенсорів є: City Technology Pellistor Sensor; Figaro TGS6812. А газоаналізатори, які працюють по даному принципу на світовому ринку представлені як: Crowcon Xgard; Honeywell Sensepoint XCD.

У напівпровідникових сенсорах загазованості принцип роботи базується на зміні електропровідності напівпровідникового шару при взаємодії з молекулами газу (рисунок 1.4). Найчастіше використовується

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

оксид олова SnO_2 . Особливостями є те, що при контакті з газом змінюється концентрація носіїв заряду, що змінює електричний опір сенсора.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд напівпровідникових сенсорів загазованості

Перевагами напівпровідникових сенсорів загазованості є низька вартість, компактність і універсальність. До недоліків можна віднести низька селективність, а також вплив вологості температурна залежність. Застосування напівпровідникових сенсорів є найрізноманітніше, а саме: побутові сигналізатори газу; системи вентиляції; Smart Home. Масовими зразками світових виробників є: Figaro TGS2611, Winsen MQ-2, Hanwei MQ-7.

Інфрачервоні газоаналізатори працюють на основі поглинання газом інфрачервоного випромінювання певної довжини хвилі (рисунок 1.5). Кожен газ має власний спектр поглинання.



Рисунок 1.5 – Загальний вигляд інфрачервоного газоаналізатора

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

До структури інфрачервоного газоаналізатора входять: ІЧ-випромінювач; газова камера; оптичний фільтр; фотоприймач. Перевагами використання газоаналізаторів такого типу є: висока точність; довговічність; стійкість до забруднення; відсутність контакту з газом. До недоліків можна віднести високу вартість та складність конструкції.

Контрольовані гази в середовищі яких працюють дані газоаналізатори це: CO₂, CH₄, пропан, фреони. На світовому ринку даний клас газоаналізаторів представлений моделями: Sensirion SCD30, Senseair S8, Siemens ULTRAMAT 23, Vaisala CARBOCAP GMP252.

Принцип роботи фотоіонізаційних сенсорів (PID) полягає у тому, що газ опромінюється ультрафіолетовою лампою, після чого молекули іонізуються (рисунок 1.6). Виникаючий струм пропорційний концентрації летких органічних сполук.



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд фотоіонізаційних сенсорів

Застосування фотоіонізаційних сенсорів найрізноманітніше, а саме: контроль VOC, нафтопереробка, хімічні виробництва. Прикладами сенсорів такого типу є: RAE Systems MiniRAE 3000, Ion Science Tiger PID.

Багатоканальні газоаналізатори в сучасних системах часто використовуються як багатоканальні модулі. Вони забезпечують [3, 4]:

- одночасний контроль декількох газів;
- інтеграцію з SCADA;
- Modbus/Ethernet;
- аварійну сигналізацію;
- журналювання подій.

Прикладами багатоканальних газоаналізаторів є: Dräger Regard 7000, Honeywell Touchpoint Plus, MSA Safety SUPREMA (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 - Загальний вигляд промислових взірців багатоканальних газоаналізаторів

У сучасних АСУ ТП газоаналізатори виконують функції формування аварійних сигналів і автоматичного перекриття газу, а також керування вентиляцією, передачі даних до SCADA (архівування подій) та дистанційного моніторингу.

При виборі газоаналізуючого обладнання враховують:

- тип контролюваного газу;
- вибухонебезпечність;
- температурний режим;
- вологість;
- необхідну точність;
- швидкодію;
- інтерфейси зв'язку;
- сертифікацію АТЕХ;
- клас ІР-захисту.

Газоаналізуюче обладнання є критично важливою складовою сучасних автоматизованих систем безпеки та технологічного контролю. Залежно від типу контролюваного газу та умов експлуатації застосовуються різні принципи газового аналізу: електрохімічний, каталітичний, інфрачервоний, напівпровідниковий та фотоіонізаційний.

Кожен тип сенсорів має власні технічні характеристики, переваги та сферу застосування. Сучасні газоаналізатори інтегруються у PLC та SCADA-системи, забезпечуючи високий рівень автоматизації, надійності та промислової безпеки.

Використання багатоканальних систем контролю загазованості дозволяє своєчасно виявляти аварійні ситуації, мінімізувати ризики вибуху та отруєння, а також підвищувати ефективність експлуатації технологічних об'єктів.

1.3 Методи вимірювання основних параметрів загазованості та етапи калібрування газоаналізаторів

Сенсори загазованості є ключовими елементами інформаційно-вимірювальних та автоматизованих систем контролю повітряного середовища у промислових котельнях, хімічних виробництвах, газорозподільчих станціях, складських приміщеннях та об'єктах енергетики. Основним завданням таких пристроїв є своєчасне виявлення небезпечних концентрацій газів та передача інформації до систем автоматичного керування, сигналізації або аварійного захисту. Ефективність функціонування сенсорів визначається низкою метрологічних, динамічних та експлуатаційних параметрів, для оцінювання яких використовуються спеціальні методи вимірювання [4].

До основних характеристик газових сенсорів належать: чутливість, селективність, діапазон вимірювання, поріг спрацювання, швидкодія, час відновлення, похибка вимірювання, стабільність параметрів, дрейф нуля, повторюваність показів, температурна та вологісна залежність, довговічність та ресурс роботи. Кожен із зазначених параметрів визначається окремими методами випробувань і вимірювань.

Чутливість характеризує здатність сенсора реагувати на зміну концентрації газу. Вона визначається зміною вихідного сигналу відносно

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

зміни концентрації контрольованого газу. Для електрохімічних сенсорів чутливість може визначатися як:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta C}$$

де S — чутливість, ΔU — зміна вихідної напруги, ΔC — зміна концентрації газу.

Сенсор поміщають у герметичну камеру, після чого подають тестовий газ із відомою концентрацією. За допомогою еталонного газового змішувача формують декілька рівнів концентрації, наприклад: 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 500 ppm. На кожному рівні реєструють вихідний сигнал сенсора: напругу, струм, зміну опору, цифрове значення. За результатами будують калібрувальну характеристику.

Селективність показує здатність сенсора реагувати саме на цільовий газ без впливу сторонніх домішок. Для прикладу:

- сенсор CO не повинен реагувати на метан;
- сенсор CH₄ не повинен реагувати на водяну пару;
- сенсор H₂S повинен мінімізувати реакцію на SO₂.

До методів вимірювання можна віднести спосіб за допомогою якого у вимірювальну камеру послідовно подають: основний газ, сторонні гази, суміші газів. Порівнюють амплітуду сигналів сенсора, а коефіцієнт селективності визначається як [5]:

$$K_s = \frac{S_{target}}{S_{interference}}$$

де S_{target} — чутливість до основного газу, $S_{interference}$ — реакція на сторонній газ. Чим більше значення коефіцієнта, тим кращою є селективність.

Швидкодія визначає час реакції сенсора на появу газу. Найчастіше використовують:

- t_{50} — час досягнення 50 % сигналу;
- t_{90} — час досягнення 90 % сигналу.

Сенсор знаходиться у чистому повітрі, після чого різко подається газова суміш із фіксованою концентрацією. Осцилограф або система збору

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

даних фіксує часову залежність вихідного сигналу. Типові значення наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики часу реакції та виду сенсора загазованості

Тип сенсора	Час реакції
Електрохімічний	10–30 с
Напівпровідниковий	5–60 с
Інфрачервоний	2–10 с
Каталітичний	5–15 с

Після видалення тестового газу визначають час повернення сигналу до початкового рівня. Цей параметр важливий для:

- циклічних процесів;
- вентиляційних систем;
- систем аварійної сигналізації.

Час відновлення часто перевищує час спрацювання.

У системах контролю загазованості промислових об'єктів точність вимірювання концентрації газів має критично важливе значення, оскільки навіть незначні помилки можуть призвести до хибного спрацювання систем аварійного захисту або, навпаки, до не виявлення небезпечної концентрації газу. Для оцінювання точності роботи сенсорів і газоаналізаторів у теорії автоматичного керування та метрології використовують три основні види похибок [5, 6]:

- абсолютну похибку;
- відносну похибку;
- приведену похибку.

Ці параметри дозволяють оцінити якість роботи інформаційно-вимірювальної системи, стабільність функціонування сенсорів та придатність

обладнання до експлуатації в автоматизованих системах керування технологічними процесами.

Абсолютна похибка показує, наскільки реальне значення, виміряне сенсором, відрізняється від істинного або еталонного значення концентрації газу. Математично абсолютна похибка визначається як:

$$\Delta = C_{\text{виз}} - C_{\text{ет}}$$

де Δ — абсолютна похибка, $C_{\text{виз}}$ — концентрація газу, визначена сенсором, $C_{\text{ет}}$ — еталонне (реальне) значення концентрації.

Абсолютна похибка вимірюється у тих самих одиницях, що і концентрація газу: ppm, % LEL, мг/м³, % об'ємної концентрації.

Абсолютна похибка є важливою при: калібруванні сенсорів, перевірці точності систем аварійної сигналізації, метрологічній атестації, тестуванні порогів спрацювання. Для сенсорів загазованості абсолютна похибка особливо важлива у зоні низьких концентрацій, коли навіть невелике відхилення може суттєво впливати на безпеку. Основними причинами виникнення абсолютної похибки є:

- нестабільність чутливого елемента;
- температурний дрейф;
- старіння сенсора;
- вплив вологості;
- електромагнітні завади;
- помилки АЦП контролера;
- неточність калібрування.

Відносна похибка показує, яку частку становить абсолютна похибка відносно реального значення концентрації. Вона визначається за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta}{C_{\text{ет}}} \cdot 100\%$$

або

$$\delta = \frac{C_{\text{вим}} - C_{\text{ет}}}{C_{\text{ет}}} \cdot 100\%$$

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Відносна похибка вимірюється у відсотках і дозволяє:

- порівнювати різні сенсори;
- оцінювати якість вимірювання при різних концентраціях;
- визначати клас точності приладу;
- аналізувати роботу сенсорів у широкому діапазоні вимірювання.

Для газоаналізаторів відносна похибка може різко зростати при малих концентраціях. Для прикладу: еталон - 10 ppm, похибка - 2 ppm. Тоді,

$$\delta = \frac{2}{10} \cdot 100\% = 20\%$$

хоча абсолютна похибка невелика, відносна похибка вже є значною. Саме тому виробники часто задають окрему абсолютну похибку для малих концентрацій і відносну — для середніх та великих.

Приведена похибка характеризує точність приладу відносно всього діапазону вимірювання. Вона визначається як відношення абсолютної похибки до верхньої межі вимірювання [6]:

$$\gamma = \frac{\Delta}{C_{\max}} \cdot 100\%$$

де γ — приведена похибка, $C_{\max}$ — максимальна межа вимірювання.

Приведена похибка в основному використовується для:

- визначення класу точності;
- порівняння вимірювальних приладів;
- стандартизації метрологічних характеристик;
- оцінювання відповідності нормативам.

Для підвищення точності сучасні автоматизовані системи використовують: автоматичну температурну компенсацію, цифрову фільтрацію, багатоточкове калібрування, алгоритми компенсації дрейфу, самодіагностику сенсорів, дублювання каналів вимірювання.

Абсолютна, відносна та приведена похибки є основними метрологічними характеристиками сенсорів загазованості та визначають точність функціонування інформаційно-вимірювальних систем контролю

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

газового середовища. Абсолютна похибка характеризує фактичне відхилення результату вимірювання від еталонного значення, відносна — дозволяє оцінити точність у відсотковому співвідношенні, а приведена — використовується для оцінювання класу точності відносно всього діапазону вимірювання.

Комплексний аналіз цих параметрів дає можливість правильно обирати сенсори для автоматизованих систем керування, забезпечувати надійність функціонування систем аварійного захисту та підвищувати безпеку експлуатації промислових об'єктів.

Метод визначення дрейфу нуля дозволяє адекватно проводити вимірювання основних параметрів сенсорів загазованості. Основною суттю параметра є те, що дрейф нуля — це зміна показів сенсора за відсутності газу. Загальновідомими причинами можуть бути: старіння елементів, температурні зміни, деградація електроліту, забруднення поверхні. Оцінюється стабільність нульового сигналу. Сенсор тривалий час працює у чистому повітрі, але періодично вимірюють:

- зміщення вихідної напруги;
- зміни струму;
- зміну цифрового значення.

Газові сенсори суттєво залежать від температури навколишнього середовища. Існують ряд методів випробувань за допомогою яких сенсор розміщують у термокамері, проводячи вимірювання при: -20°C , 0°C , $+20^{\circ}\text{C}$, $+40^{\circ}\text{C}$, $+60^{\circ}\text{C}$. Порівнюють зміну характеристик: чутливості, швидкодії, похибки, нульового сигналу.

Висока вологість може змінювати електропровідність та викликати конденсацію, спотворюючи результати вимірювання. Для випробовування і калібрування є перевірені методики, а саме у кліматичній камері створюють: 30 % RH, 60 % RH, 90 % RH. Проводять вимірювання при постійній концентрації газу.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Калібрування є одним із найважливіших етапів експлуатації сенсорів загазованості і газоаналізаторів. Одноточкове калібрування це використання однієї еталонної концентрації. Такий спосіб калібрування підходить для побутових систем і сигналізаторів метану.

Багатоточкове калібрування - використання декількох концентрацій, що дозволяє побудувати точну характеристику і оцінити не лінійність. Аналогічно існують Методи тестування на довговічність або прискорені випробування для оцінки ресурсу сенсорів, також застосовують [7]:

- температурне старіння;
- циклічне навантаження;
- безперервну роботу;
- вплив агресивних середовищ.

В процесі тестування оцінюються:

- деградація чутливості;
- зміна часу реакції;
- стабільність калібрування.

Особливості вимірювання параметрів сенсорів для прикладу електрохімічні сенсорів, вимірюють струм електрохімічної реакції та швидкість дифузії газу (сенсори типу - Honeywell Sensepoint XCD, Dräger Polytron).

Особливостями вимірювання параметрів напівпровідникових сенсорів - контроль зміни опору чутливого шару (сенсори типу - Figaro Engineering TGS2611, Winsen MQ-2).

Особливостями вимірювання параметрів інфрачервоних сенсорів - вимірювання поглинання ІЧ-випромінювання молекулами газу (сенсори типу - Senseair K30, Dynament infrared sensors).

Особливостями вимірювання параметрів каталітичних сенсорів - визначення теплового ефекту окислення газу (сенсори типу - MSA Safety catalytic sensors, Crowcon gas detectors).

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні системи контролю загазованості дедалі частіше використовують: цифрову фільтрацію сигналів, автоматичну температурну компенсацію, самодіагностику, алгоритми прогнозування несправностей, інтелектуальне калібрування. У промислових ІВС сенсори інтегруються через:

- Modbus RTU;
- BACnet;
- HART;
- Profibus;
- Ethernet/IP.

Це дозволяє реалізувати централізований моніторинг та автоматичне керування системами вентиляції, аварійного захисту та газопостачання. Методи вимірювання параметрів сенсорів загазованості є основою забезпечення точності, надійності та безпеки автоматизованих систем контролю газового середовища. Основними параметрами, що підлягають оцінюванню, є чутливість, селективність, швидкодія, похибка, стабільність та стійкість до зовнішніх впливів. Для їх визначення використовуються спеціалізовані методики із застосуванням калібрувальних газових сумішей, термокамер, кліматичних стендів та еталонних газоаналізаторів.

Сучасні сенсори загазованості забезпечують високу точність контролю та можуть інтегруватися у складні автоматизовані системи керування промисловими об'єктами. Використання цифрових методів обробки сигналів, автоматичної компенсації температурних впливів та інтелектуальних алгоритмів калібрування дозволяє суттєво підвищити ефективність і надійність систем газового контролю у промислових котельнях та інших об'єктах підвищеної небезпеки.

Калібрування газоаналізаторів є однією з ключових процедур забезпечення точності та достовірності вимірювання концентрації газів у промислових, комунальних та побутових системах контролю загазованості. Від правильності калібрування залежить ефективність роботи інформаційно-

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювальної системи, безпека персоналу та надійність автоматизованої системи керування технологічним об'єктом.

Процес калібрування полягає у порівнянні показів газоаналізатора з еталонними значеннями концентрацій контрольних газових сумішей та подальшому коригуванні параметрів вимірювання. На першому етапі здійснюється підготовка газоаналізатора та допоміжного обладнання до проведення калібрування [8]. До підготовчих операцій належать: зовнішній огляд приладу, перевірка цілісності корпусу та сенсорів, контроль стану кабельних з'єднань, перевірка джерел живлення, перевірка працездатності насосів та фільтрів, прогрівання газоаналізатора до робочого режиму.

Більшість сучасних приладів потребують певного часу стабілізації після ввімкнення. Наприклад, електрохімічні сенсори можуть вимагати 5–15 хвилин прогріву, а інфрачервоні — до 30 хвилин. Також на цьому етапі готуються: редуктори, калібрувальні камери, ротаметри, шланги, еталонні газові суміші.

Наступним етапом є встановлення нульового значення вимірювання. Для цього на вхід газоаналізатора подається чисте повітря, як правило азот, пізніше спеціальна нульова газова суміш. Метою процедури є усунення початкового зміщення характеристики сенсора. У процесі нульового калібрування визначається базовий сигнал сенсора та компенсується дрейф нуля, після цього виконується автоматичне або ручне встановлення нульового показу.

Для прикладу:

- для сенсорів метану використовується очищене повітря;
- для кисневих сенсорів часто застосовується азот;
- для високоточних лабораторних систем використовуються спеціальні нульові гази.

Наявність помилки нуля може призвести до значного спотворення результатів вимірювання при малих концентраціях газу. Після встановлення нульової точки проводиться основне калібрування за допомогою еталонної

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

газової суміші. Еталонна суміш повинна мати точно відому концентрацію та бути сертифікованою і відповідати типу контрольованого газу.

Після подачі контрольного газу аналізується реакція сенсора на відому концентрацію. На цьому етапі визначається коефіцієнт перетворення та оцінюється лінійність характеристики, що дозволяє встановлювати масштабний коефіцієнт. Якщо покази газоаналізатора відрізняються від еталонного значення, виконується корекція:

$$K = \frac{C_{\text{еталон}}}{C_{\text{виміряне}}}$$

де K — коефіцієнт корекції, $C_{\text{еталон}}$ — еталонна концентрація, $C_{\text{виміряне}}$ — показ приладу. Після корекції система повинна забезпечити мінімальну похибку вимірювання.

Для точних промислових систем додатково проводиться перевірка лінійності сенсора. На вхід послідовно подаються кілька еталонних концентрацій (20%, 40%, 60%, 80%, 100% діапазону вимірювання). Після цього будується калібрувальна характеристика. Оцінюються: не лінійність, гістерезис, стабільність, повторюваність показів.

Для сучасних мікропроцесорних газоаналізаторів можливе:

- автоматичне апроксимування характеристики;
- цифрова компенсація похибок;
- програмна корекція не лінійності.

Одним із важливих параметрів є швидкодія газоаналізатора. Під час калібрування визначають час відгуку T_{90} , час стабілізації, інерційність системи. Параметр T_{90} показує час, за який покази досягають 90% реального значення після подачі газу. Типові значення для різних сенсорів становлять: електрохімічні сенсори - 15–60 с; напівпровідникові - 20–120 с; інфрачервоні - 5–30 с.

У промислових системах калібрування включає перевірку роботи:

- світлової сигналізації;
- звукової сигналізації;

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

- релейних виходів;
- систем вентиляції;
- аварійного відключення газу.

Для цього створюється контрольна концентрація, яка перевищує встановлений поріг спрацювання. Перевіряється, правильність формування аварійного сигналу та час спрацювання, паралельно перевіряється робота автоматичних клапанів і активація систем диспетчеризації.

Після завершення калібрування оформлюється відповідна документація. До неї входять: дата проведення, тип газоаналізатора, серійний номер, використані газові суміші, результати вимірювання, значення похибок, висновок про придатність приладу.

У сучасних системах результати можуть автоматично записуватись у пам'ять і передаватися до SCADA-систем паралельно архівуватись у хмарних сервісах.

Частота калібрування залежить від типу сенсора, а також умов експлуатації, відповідно встановлюються вимоги нормативних документів та рівня небезпеки об'єкта. Типовими інтервалами калібрування є для:

- переносних газоаналізаторів — 1 раз на 1–3 місяці;
- стаціонарних систем — 1 раз на 6–12 місяців;
- критичні промислові об'єкти — щомісячна перевірка.

У важких умовах експлуатації калібрування виконується частіше через абруднення сенсорів, деградацію електродів та вплив температури та вологості.

Сучасні інтелектуальні газоаналізатори можуть підтримувати функцію автоматичного калібрування. Такі системи забезпечують: автоматичну подачу еталонного газу, самодіагностику, цифрову компенсацію похибок, віддалений моніторинг. Автоматичне калібрування особливо ефективно для великих промислових об'єктів, великих міських котелень, хімічних підприємств, систем безперервного моніторингу.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Калібрування газоаналізаторів є обов'язковою процедурою забезпечення точності та надійності систем контролю загазованості. Воно дозволяє мінімізувати похибки вимірювання, забезпечити правильну роботу аварійної сигналізації та підвищити безпеку експлуатації промислових об'єктів.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗАГАЗОВАНOSTІ ПРОМИСЛОВОЇ КОТЕЛЬНОЇ

2.1 Розробка структурної та функціональної схеми комплексу технічних засобів інформаційно-вимірювальної системи

Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості промислової котельної установки є складовою автоматизованої системи керування технологічним процесом і призначена для безперервного контролю концентрації небезпечних газів у приміщеннях котельні, своєчасного виявлення аварійних ситуацій, формування сигналів тривоги та автоматичного керування засобами захисту.

Необхідність впровадження подібних систем пояснюється високим рівнем потенційної небезпеки котельних установок, у яких використовуються природний газ, зріджений газ або інші горючі паливні суміші. Порушення герметичності трубопроводів, несправність пальникових пристроїв, вентиляційних систем або арматури може призвести до накопичення вибухонебезпечних концентрацій газу та створення аварійної ситуації.

Основними завданнями інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості є [8, 9]:

- безперервний моніторинг концентрації небезпечних газів;
- раннє виявлення витоків газу;
- контроль вмісту чадного газу;
- контроль рівня кисню;
- передача інформації до автоматизованої системи керування;
- формування попереджувальної та аварійної сигналізації;
- автоматичне відключення подачі газу;
- активація аварійної вентиляції;
- архівування параметрів та ведення журналу подій.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ІВС повинна забезпечувати високу точність вимірювання, надійність функціонування, завадостійкість, швидкодію та відповідність вимогам промислової безпеки.

Структура ІВС контролю загазованості формується відповідно до принципів побудови автоматизованих систем керування технологічними процесами та включає (рисунок 2.1):

- первинні вимірювальні перетворювачі (сенсори загазованості);
- підсистему збору та обробки інформації;
- контролер керування;
- підсистему сигналізації;
- виконавчі механізми;
- підсистему диспетчеризації та моніторингу;
- канали передачі даних;
- систему резервного живлення.

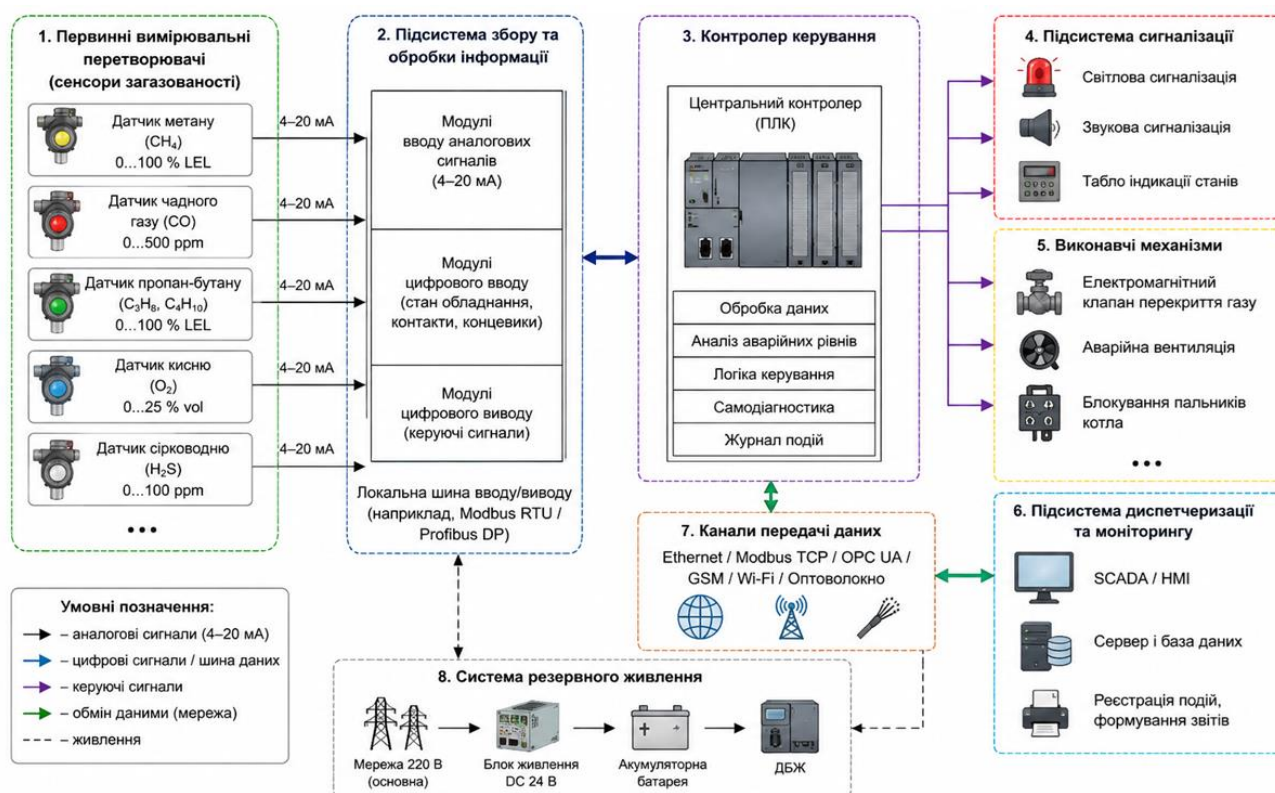


Рисунок 2.1 – Структурна схема ІВС контролю загазованості промислової котельної установки

Основними елементами структури системи є сенсори загазованості. Первинними елементами ІВС є газові сенсори, які здійснюють безпосереднє вимірювання концентрації контрольованих газів. У промислових котельнях найчастіше контролюються: метан (CH_4), пропан-бутан, чадний газ (CO), сірководень (H_2S), кисень (O_2). Для реалізації системи можуть застосовуватись наступні типи сенсорів: напівпровідникові, електрохімічні, інфрачервоні.

Напівпровідникові сенсори призначені для виявлення горючих газів і представлені на світовому ринку широким асортиментом (MQ-2, MQ-4, Figaro TGS2611). До основних переваг можна віднести низьку вартість та відносно високу чутливість, що супроводжується простотою реалізації. Відповідно є і свої недоліки - значна температурна залежність та невисока селективність, що в свою чергу дає незначний дрейф характеристик.

Електрохімічні сенсори використовуються для контролю токсичних газів. На прикладі Alphasense CO-A4 та Membrapor CO/SF-100 або City Technology 4OXV. Перевагами електрохімічних сенсорів є: висока точність, добра селективність, низьке енергоспоживання. Недоліками є обмежений ресурс та чутливість до вологості.

Інфрачервоні сенсори застосовуються для контролю концентрації вуглеводневих газів. Для прикладу: Senseair, Dynament, Honeywell Searchline Excel. Перевагами є висока стабільність, відсутність контакту з газом, тривалий термін служби. До недоліків можна віднести високу вартість і складність конструкції.

Сигнали від сенсорів надходять до модулів збору інформації. Для цього використовуються модулі вводу/виводу, які мають [9]:

- аналогові входи 4–20 мА;
- інтерфейси RS-485;
- Modbus RTU;
- HART-протокол.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На даному етапі виконується фільтрація сигналів та масштабування з цифровою обробкою, а також компенсація температурних впливів, після цього відбувається перевірка достовірності даних.

Основним елементом IBC є програмований логічний контролер (ПЛК), який виконує головну функцію і відповідає за: збір даних, аналіз стану системи, логічну обробку, формування керуючих сигналів, реалізацію алгоритмів захисту. Для котельних установок доцільно використовувати промислові ПЛК, а саме:

- Siemens S7-1200;
- Siemens LOGO! 8;
- Schneider Electric Modicon;
- OWEN ПЛК;
- WAGO PFC200.

В процесі роботи IBC базовий контролер забезпечує циклічне опитування сенсорів, порівняння концентрації газів із порогами та формування аварійних повідомлень. В разі перевищень допустимих концентрацій ПЛК формує команди на увімкнення вентиляції, аварійне відключення подачі газу та передачу даних до SCADA.

Функціональна схема IBC визначає взаємозв'язок між вимірювальними, логічними та виконавчими елементами системи. До основних функціональних вузлів відносять: вузол контролю загазованості, вузол логічної обробки, вузол аварійної сигналізації, вузол керування вентиляцією, вузол аварійного перекривання газу.

Вузол контролю загазованості включає у свій склад: сенсори, вимірювальні перетворювачі та модулі нормалізації сигналів. Основними функціями даного модуля є вимірювання концентрації відповідних газів перетворення сигналів та передачею інформації до ПЛК.

Вузол логічної обробки реалізується на базі ПЛК і виконує: аналіз аварійних рівнів, формування команд керування, самодіагностику системи,

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контроль справності сенсорів. А також ведеться журнал подій, для аналізу будь-яких ситуацій в процесі функціонування.

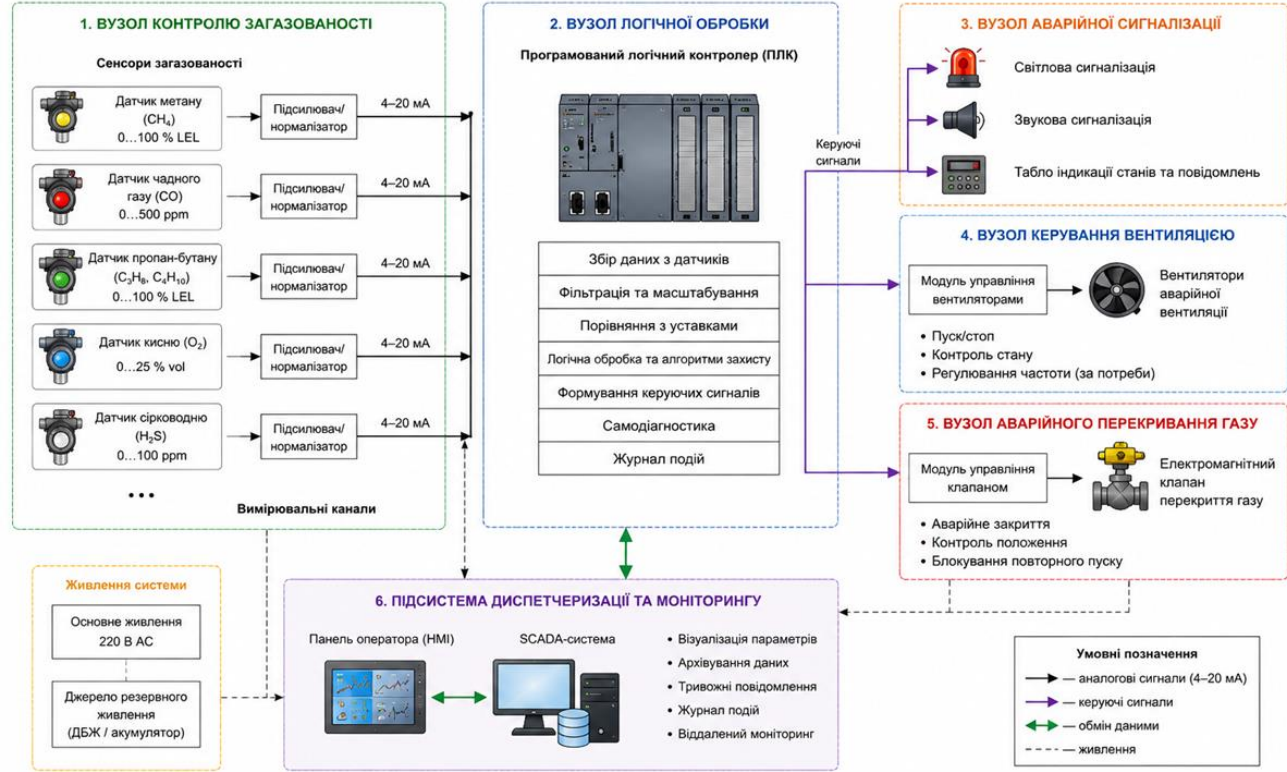


Рисунок 2.2 – Функціональна схема ІВС контролю загазованості промислової котельної установки

Вузол аварійної сигналізації містить у своєму складі світло-звукові сповіщувачі на випадок нештатних ситуацій. Самі розповсюджені це: різнотипні сирени, світлові маяки, сигнальні лампи, панелі оператора. При перевищенні порогових значень загазованості система активує звукову сигналізацію, виводить повідомлення та запускає аварійні алгоритми.

Вузол керування вентиляцією призначений для примусового видалення небезпечних газів з приміщень котельної установки. До складу електронно-технічного забезпечення вузла входять: контактори, частотні перетворювачі, вентилятори, виконавчі реле.

Вузол аварійного перекриття газу реалізується за допомогою електромагнітних клапанів, моторизованих засувок та релейних модулів. У

разі аварії ПЛК формує сигнал на перекриття газопроводу та блокування повторного запуску і відповідно передачу сигналу диспетчеру.

Система диспетчеризації для централізованого контролю використовує SCADA-систему. На сьогоднішній день доступні ряд можливих платформ для її реалізації. Самим розповсюдженими є платформи:

- WinCC;
- SCADA TRACE MODE;
- MasterSCADA;
- Ignition.

SCADA система забезпечує основні функціональні можливості у вигляді: візуалізації параметрів, архівуванні, формування під час нештатних ситуацій та аварій тривожні повідомлення, ведення журналів, дистанційний контроль. Для забезпечення і підвищення надійності ІВС застосовуються додаткові модулі, а саме: резервування живлення, дублювання сенсорів, самодіагностика, контроль обриву ліній, захист від електромагнітних завад. Запроектована система повинна відповідати вимогам вибухозахисту, стандартам електробезпеки та вимогам пожежної безпеки.

Розроблена структура та функціональна схема інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості промислової котельної установки дозволяє забезпечити безперервний автоматизований контроль небезпечних концентрацій газів, підвищити рівень промислової безпеки та автоматизувати процес аварійного реагування [10].

Основу системи становлять сучасні сенсори загазованості, програмований логічний контролер, засоби аварійного захисту та система диспетчеризації. Запропонована структура характеризується модульністю, масштабованістю та можливістю інтеграції до загальної автоматизованої системи керування технологічним процесом.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

2.2 Розробка алгоритму роботи інформаційно-вимірювальної газоаналізуючої системи

Основною задачею ІВС є автоматизований моніторинг концентрації небезпечних газів у приміщенні виробничих приміщеннях, формування попереджувальних та аварійних сигналів, а також реалізації алгоритмів захисту технологічного обладнання та персоналу.

Розробка алгоритму роботи ІВС є одним із ключових етапів проектування систем автоматизації промислових об'єктів, оскільки саме алгоритм визначає порядок функціонування системи, взаємодію між її вузлами, послідовність виконання команд та логіку реагування на аварійні ситуації. Основною метою алгоритму є забезпечення безперервного контролю концентрації небезпечних газів та швидкого виявлення витоків і мінімізації ризику вибуху чи отруєння персоналу. Паралельно виконується автоматичне аварійне реагування на наслідки підвищуючи рівень безпеки експлуатації котельної установки. Алгоритм функціонування системи повинен забезпечувати [11]:

- циклічне опитування сенсорів;
- аналіз вимірних параметрів;
- фільтрацію та обробку сигналів;
- порівняння вимірних значень із допустимими порогоми;
- формування сигналів керування;
- активацію аварійних виконавчих механізмів;
- передачу інформації до систем диспетчеризації.

Формулюючи алгоритм роботи підсистеми безпеки ІВС котельної установки потрібно зосередити основну увагу на основних функціональних режимах роботи системи (рисунк 2.3). Кожний режим характеризується власною логікою функціонування та набором керуючих дій. Для забезпечення стабільної та безпечної роботи котельної установки алгоритм ІВС передбачає декілька режимів функціонування, а саме:

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- режим нормального контролю;
- режим попередження;
- аварійний режим;
- режим самодіагностики;
- режим технічного обслуговування;
- режим відновлення після аварії.

Режим нормального контролю у штатному режимі коли система працює в режимі постійного моніторингу концентрації контрольованих газів. До контрольованих параметрів належать: концентрація метану, концентрація пропан-бутану, рівень чадного газу, концентрація сірководню, рівень кисню. Газові сенсори безперервно вимірюють концентрацію газів у контрольованих зонах котельні. Аналогові сигнали від сенсорів у вигляді струмового інтерфейсу 4–20 мА або цифрових даних передаються до модулів вводу програмованого логічного контролера. Алгоритм роботи системи в нормальному режимі включає наступні етапи:

- опитування сенсорів;
- зчитування аналогових сигналів;
- перетворення сигналів у цифровий формат;
- масштабування вимірюваних параметрів;
- фільтрація шумів та випадкових завад;
- аналіз достовірності отриманих даних;
- відображення інформації на операторській панелі;
- архівування результатів вимірювання.

На цьому етапі система не виконує аварійних дій, а лише забезпечує контроль стану повітряного середовища. Підтримуючи нормальний режим роботи автоматизованої системи технологічних процесів.

Алгоритм опитування сенсорів функціонує для забезпечення своєчасного виявлення небезпечних концентрацій газів використовується циклічний алгоритм опитування сенсорів.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

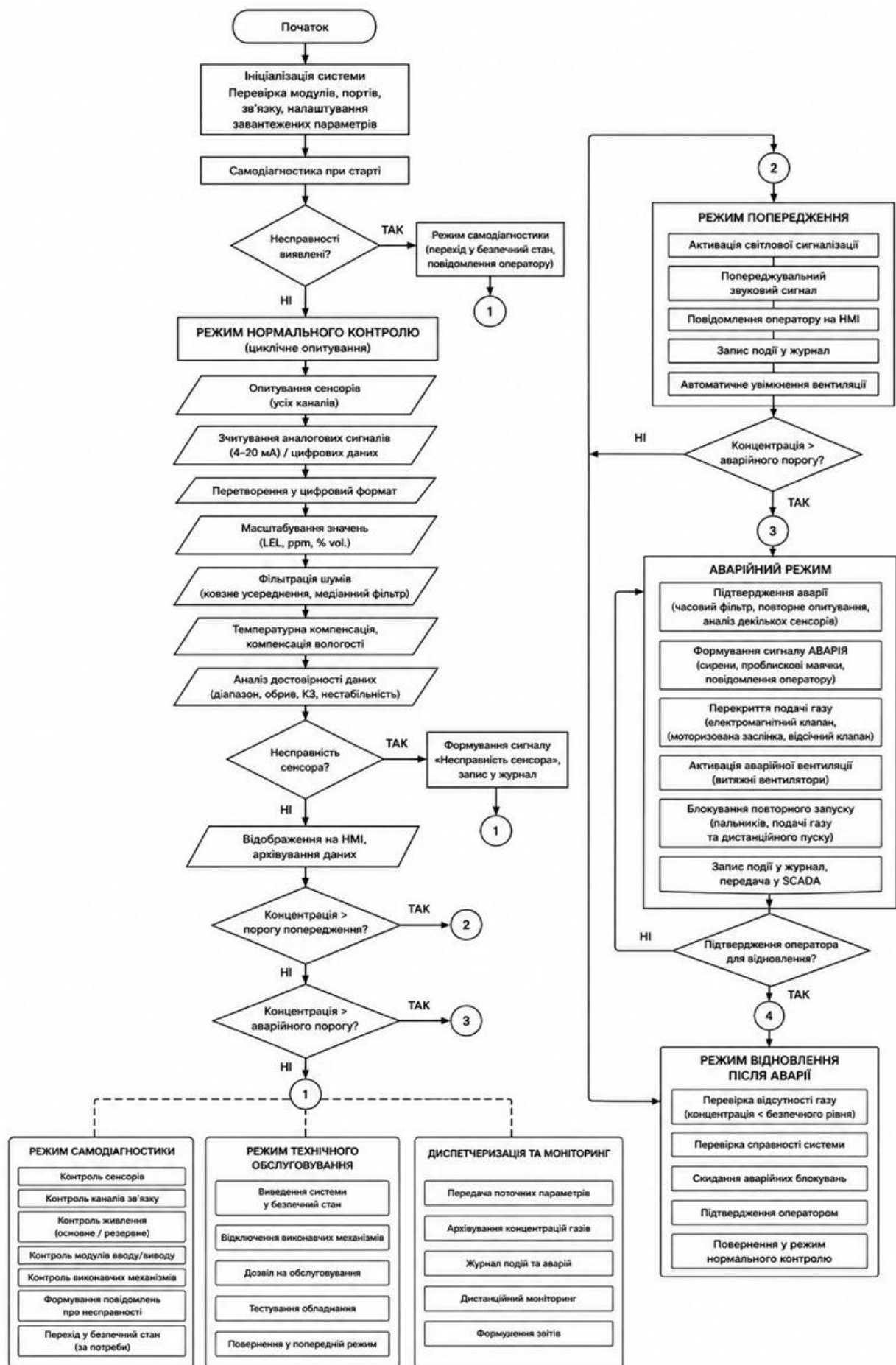


Рисунок 2.3 – Алгоритм роботи ІВС загазованості котельні

Період опитування залежить від типу газу та швидкості зміни концентрації, а також класу небезпеки об'єкта і в свою чергу від вимог нормативної документації. Зазвичай час циклу опитування становить 0,5–2 сек. для горючих газів і 1–5 сек. для токсичних газів. Після зчитування сигналів виконується перевірка виходу сигналу за допустимий діапазон, обриву лінії та короткого замикання або нестабільності сенсора. При виявленні несправності система формує сигнал «Несправність сенсора».

Обробка вимірювальної інформації на етапі обробки сигналів контролер виконує. Фільтрацію даних для усунення імпульсних завад застосовується з використанням цифрових фільтрів, ковзного усереднення та медіанної фільтрації. Це дозволяє уникнути помилкових спрацьовувань системи.

Масштабування сигналів – коли сигнали 4–20 мА перетворюються у фізичні величини, а саме: % нижньої концентраційної межі вибуховості (LEL), ppm та % vol [12]. Для прикладу - 4 мА відповідає 0 % LEL, а 20 мА відповідає 100 % LEL.

Температурна компенсація дуже важлива у таких випадках. Оскільки характеристики газових сенсорів залежать від температури та вологості, алгоритм може включати: температурну корекцію, компенсацію вологості, автоматичне калібрування.

Режим попередження функціонує при досягненні попереджувального рівня концентрації газу, система переходить у режим попередження. Типові пороги це 10–20 % LEL для горючих газів і 20–50 ppm для чадного газу. У цьому режимі алгоритм виконує:

- активацію світлової сигналізації;
- виведення повідомлення оператору;
- запис події до журналу;
- попереджувальний звуковий сигнал;
- автоматичне увімкнення вентиляції.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Попереджувальний режим дозволяє оперативно реагувати на появу небезпечної ситуації до досягнення критичного рівня.

Алгоритм аварійного режиму спрацьовує при перевищенні аварійного порога система переходить у режим аварійного захисту. Типові аварійні рівні це 20–40 % LEL для метану і 100 ppm і більше для чадного газу. У цьому режимі алгоритм виконує комплекс аварійних дій. Основні етапи аварійного алгоритму - підтвердження аварії. Для виключення хибного спрацьовування використовується часовий фільтр та повторне опитування і аналіз декількох сенсорів.

Формування сигналу аварії відбувається після підтвердження аварії системою, тільки після цього вмикаються сирени, активують пробіскові маячки і відповідно формується аварійне повідомлення. Перекриття подачі газу відбувається за командою контролера, який формує сигнал на електромагнітний клапан та моторизовану засувку і відсічний клапан. Подача газу припиняється автоматично.

Активація аварійної вентиляції відбувається автоматично, система запускає витяжні вентилятори, що забезпечується ефективно димовидалення та примусову вентиляцію.

Блокування повторного запуску, алгоритм блокує запуск пальників та повторну подачу газу і дистанційний пуск обладнання. Відновлення роботи можливе лише після підтвердження оператором.

Алгоритм самодіагностики системи активується для забезпечення високої надійності ІВС, алгоритм передбачає автоматичну самодіагностику. Контролюються: справність сенсорів, стан каналів зв'язку, живлення, справність модулів вводу-виводу і працездатність виконавчих механізмів. У разі виявлення несправності система автоматично формує повідомлення та переводить систему у безпечний стан, активуючи резервні алгоритми.

Алгоритм резервування живлення є не від'ємним елементом даного рівня систем. Оскільки система контролю загазованості належить до систем безпеки, вона повинна функціонувати навіть при втраті основного живлення.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Алгоритм роботи резервного живлення включає [13]:

- контроль напруги основної мережі;
- автоматичне перемикання на ДБЖ;
- контроль заряду акумуляторів;
- передачу повідомлення про аварію живлення;
- повернення до основного живлення після відновлення мережі.

Алгоритм диспетчеризації та моніторингу паралельно виконується, так як IBC інтегрується із SCADA-системою або диспетчерським пунктом. Алгоритм передбачає передачу поточних параметрів відповідним абонентам, а також архівування концентрацій газів і журналюванні аварій та дистанційний моніторинг, формування звітів. Для передачі даних використовуються наступні способи передачі даних:

- Modbus RTU;
- Modbus TCP;
- OPC UA;
- Ethernet;
- GSM-зв'язок.

Особливості програмної реалізації алгоритму передбачає реалізацію роботи підсистеми безпеки IBC за допомогою різноманітних програмних продуктів. Алгоритм роботи системи реалізується у програмованому логічному контролері за допомогою: LAD-діаграм, Function Block Diagram, Structured Text, Sequential Function Chart. До основних програмних блоків можна віднести:

- блок опитування сенсорів;
- блок обробки даних;
- блок аварійної логіки;
- блок керування виконавчими механізмами;
- блок архівування;
- блок самодіагностики.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимоги до швидкодії алгоритму є високими, так як система повинна забезпечувати мінімальний час реагування при стабільній роботі та високу завадостійкість і безперервність контролю. Типовий час реакції - до 1–2 сек. для аварійного вимкнення і до 0,5 сек. для сигналізації.

Переваги автоматизованого алгоритму керування є основний функціонал, що забезпечує:

- автоматичне виявлення аварій;
- швидке реагування;
- мінімізацію людського фактору;
- підвищення промислової безпеки;
- інтеграцію із загальною АСУ ТП;
- централізований моніторинг.

Розроблений алгоритм роботи інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості промислової котельної установки забезпечує ефективний безперервний моніторинг небезпечних газів, автоматичне реагування на аварійні ситуації та високий рівень безпеки технологічного процесу.

Алгоритм охоплює всі основні режими функціонування системи, саме: нормальний контроль, попередження, аварійний захист, самодіагностику та диспетчеризацію. Реалізація запропонованого алгоритму дозволяє значно підвищити надійність експлуатації котельної установки, знизити ризик виникнення аварій та забезпечити відповідність сучасним вимогам промислової безпеки.

2.3 Обґрунтування вибору засобів автоматизації для проектування інформаційно-вимірювальної системи

Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості промислової котельної установки належить до категорії систем підвищеної відповідальності, оскільки забезпечує безперервний контроль

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибухонебезпечних та токсичних газів у приміщеннях котельні. При проектуванні системи особливу увагу необхідно приділити вибору технічних засобів автоматизації, які повинні забезпечувати високу точність вимірювання, стабільність роботи у промислових умовах, швидкодію, надійність передачі даних та можливість інтеграції до автоматизованої системи керування технологічними процесами.

Під час вибору елементної бази враховувались наступні критерії [13]:

- відповідність вимогам промислової безпеки;
- наявність промислового виконання та вибухозахисту;
- підтримка стандартних інтерфейсів передачі даних;
- можливість роботи в умовах підвищеної вологості та температури;
- сумісність із SCADA-системами;
- висока завадостійкість;
- простота технічного обслуговування;
- можливість масштабування системи.

До основних технічних засобів ІВС контролю загазованості промислової котельні належать: газові сенсори, програмований логічний контролер, модулі вводу-виводу, операторська панель, виконавчі механізми, система аварійної сигналізації, SCADA-система, резервне живлення, комунікаційне обладнання.

Найбільш відповідальним елементом системи контролю загазованості є газові сенсори, оскільки саме вони виконують безпосереднє вимірювання концентрації небезпечних газів у контрольованих зонах котельні. Для даного проекту доцільно використовувати стаціонарні промислові газоаналізатори Honeywell Sensepoint XCD (рисунок 2.4). Промисловий газоаналізатор Honeywell Sensepoint XCD відноситься до стаціонарного типу. Контрольовані гази: метан (CH_4), пропан-бутан, чадний газ (CO), сірководень (H_2S), кисень (O_2). До основних характеристик відносять:

- аналоговий вихід - 4–20 мА;
- підтримка Modbus RTU;

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

- LCD-дисплей;
- ступінь захисту IP66;
- вибухозахищене виконання;
- температура експлуатації від -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд промислового газоаналізатора Honeywell Sensepoint XCD

Основною причиною вибору даного газоаналізатора є його універсальність та промислове виконання. Прилад дозволяє реалізувати централізований контроль декількох типів газів та підтримує інтеграцію з PLC через стандартні промислові інтерфейси. Крім того, Honeywell Sensepoint XCD характеризується високою стабільністю вимірювання та мінімальним дрейфом характеристик, що є важливим для систем безпеки. Застосування у схемі ІВС є специфічне і має свої передумови передбачені заводом виробником. Газоаналізатори даного типу встановлюються біля газових пальників, поблизу газових колекторів у верхній зоні приміщення для контролю метану, а також у нижній зоні приміщення для контролю пропан-бутану і біля вентиляційних каналів [14].

Газовий сенсор чадного газу Alphasense CO-A4, основне призначення його це використання для контролю концентрації чадного газу (рисунок 2.5). Для задач проектування ІВС загазованості приміщень промислової котельні доцільно використати електрохімічний сенсор Alphasense CO-A4. Основними

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

перевагами такого сенсора є: висока селективність, низьке енергоспоживання, швидкий час реакції, висока точність вимірювання, малий рівень шумів.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд газового сенсора чадного газу Alphasense CO-A4

Сенсор характеризується стабільною роботою при тривалому безперервному режимі експлуатації та широко використовується у промислових системах газового моніторингу. Сенсор використовується у складі локальних газоаналізаторів для контролю рівня CO у зоні роботи персоналу та поблизу димовідвідних систем.

Кисневий сенсор City Technology 4OxV, застосовується для контролю концентрації кисню (рисунок 2.6). Запропоновано використовувати електрохімічний сенсор City Technology 4OxV при експлуатації систем безпеки у приміщеннях промислових котельних установок.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд кисневого сенсора City Technology 4OxV

До основних характеристик сенсора City Technology 4OXV можна віднести: високу стабільність, малу похибку вимірювання, швидкий відгук, тривалий ресурс експлуатації. Контроль кисню дозволяє оцінювати ефективність вентиляції та своєчасно виявляти небезпечне витіснення кисню газами.

Центральним елементом системи є програмований логічний контролер, який виконує: опитування сенсорів, логічну обробку даних, аналіз аварійних ситуацій, формування керуючих сигналів, керування виконавчими механізмами, передачу даних до SCADA. Для реалізації системи обрано програмований логічний контролер Siemens S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд програмованого логічного контролера IBC
Siemens S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC

Основними характеристиками Siemens S7-1200 CPU 1214C є:

- 14 дискретних входів;
- 10 дискретних виходів;
- підтримка Ethernet;
- підтримка Modbus TCP;
- можливість розширення модулями;
- висока швидкодія;
- вбудовані функції діагностики.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Основною причиною вибору Siemens S7-1200 є його широке використання у промислових системах автоматизації та висока сумісність із сучасними SCADA-системами. Контролер забезпечує достатню швидкодію для реалізації алгоритмів аварійного реагування, час яких не повинен перевищувати 1–2 секунди.

Аналоговий модуль Siemens SM1231 AI використовується для підключення газоаналізаторів (рисунок 2.8). Використання аналогового модуля Siemens SM1231 AI в IBC вирішує ряд актуальних задач. Основними параметрами модуля є:

- підтримка сигналів 4–20 мА;
- 4 аналогових входи;
- висока роздільна здатність;
- цифрова фільтрація сигналів.



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд аналогового модуль Siemens SM1231 AI

Модуль забезпечує точне перетворення струмових сигналів у цифрові значення для подальшої обробки контролером. Модуль використовується для підключення: сенсорів CH_4 , сенсорів CO , сенсорів O_2 , сенсорів H_2S .

Для локального контролю параметрів системи та відображення аварійних повідомлень запропонованій IBC використовується операторська панель Siemens KTP700 Basic PN (рисунок 2.9).

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

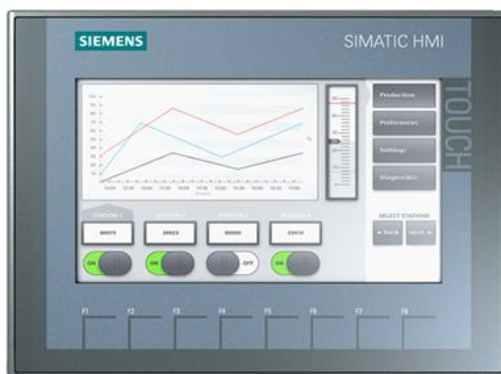


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд операторської панелі
Siemens KTP700 Basic PN

Основними характеристиками Siemens KTP700 Basic PN є:

- сенсорний дисплей 7";
- підтримка Ethernet;
- інтеграція із TIA Portal;
- підтримка аварійних повідомлень;
- архівування подій.

Операторська панель забезпечує відображення основного функціоналу ІВС, а саме: відображення концентрації газів, індикацію аварій, журналювання подій, ручне керування вентиляцією, підтвердження аварій оператором. Застосування НМІ-панелі значно підвищує зручність експлуатації системи та дозволяє оператору швидко оцінювати поточний стан котельної установки.

Для реалізації світлової та звукової сигналізації доцільно використовувати промислові сигнальні пристрої Schneider Electric Harmony (рисунок 2.10). Світлосигнальна колона Schneider Electric Harmony XVB основними перевагами якої є:

- модульна конструкція;
- висока яскравість;
- ресурс понад 50000 годин;
- промислове виконання.



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд світлосигнальних колон Schneider Electric Harmony XVB

Світлосигнальні колони використовуються для індикації: нормального режиму роботи, режиму попередження, аварійного режиму, несправності системи.

Для звукового оповіщення використовується промислова сирена Eaton Fulleon (рисунок 2.11). Основними характеристиками сирена Eaton Fulleon є:

- високий рівень звукового тиску;
- низьке енергоспоживання;
- тривалий ресурс роботи;
- стійкість до промислових умов.



Рисунок 2.11 – Загальний вигляд промислової сирени Eaton Fulleon

Сирена активується автоматично при перевищенні аварійного порога концентрації газу [15]. У випадку аварійної ситуації система повинна автоматично припиняти подачу газу та вмикати аварійну вентиляцію, для

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

таких задач використовується електромагнітний клапан Madas EVP/NC (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Загальний вигляд електромагнітного клапана Madas EVP/NC

Для аварійного перекриття подачі газу використовується електромагнітний клапан Madas EVP/NC, основними характеристиками якого є:

- нормально-закрите виконання;
- швидкий час спрацювання;
- робочий тиск до 500 мбар;
- підтримка промислових газових систем.

Після отримання аварійного сигналу від PLC клапан автоматично перекриває подачу газу до пальникового обладнання.

Для керування аварійною вентиляцією використовується частотний перетворювач Danfoss VLT Micro Drive FC-51 (рисунок 2.13). Основними перевагами якого є:

- плавний пуск вентиляторів;
- зниження пускових струмів;
- регулювання продуктивності вентиляції;
- вбудований захист двигуна.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.13 – Загальний вигляд частотний перетворювач Danfoss VLT Micro Drive FC-51

Використання частотного перетворювача дозволяє підвищити енергоефективність системи вентиляції та забезпечити стабільну роботу вентиляторів.

Для централізованого моніторингу та диспетчеризації обрана SCADA-система SIMATIC WinCC Professional. SCADA-система SIMATIC WinCC Professional забезпечує:

- візуалізацію технологічного процесу;
- архівування параметрів;
- журналювання аварій;
- формування звітів;
- дистанційний моніторинг;
- передачу даних через Ethernet.

Основною перевагою WinCC є повна інтеграція із обладнанням Siemens та підтримка промислових протоколів OPC UA і Modbus TCP.

Для забезпечення безперервної роботи системи при зникненні основного живлення використовується джерело безперебійного живлення APC Smart-UPS 1500 (рисунок 2.14). Основними характеристиками ДБЖ є:

- автоматичне перемикання на акумулятор;
- чиста синусоїда;
- захист від перенапруг;

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- час автономної роботи до 30 хвилин.



Рисунок 2.14 – Загальний вигляд джерела безперебійного живлення
APC Smart-UPS 1500

Резервне живлення забезпечує безперервну роботу PLC, роботу SCADA та функціонування системи сигналізації і збереження архівних даних.

У результаті проведеного аналізу для реалізації інформаційно-виміральної системи контролю загазованості промислової котельної установки було обрано сучасні промислові засоби автоматизації, які забезпечують високий рівень функціональної безпеки, надійності та швидкодії.

Використання газоаналізаторів Honeywell Sensepoint XCD, програмованого логічного контролера Siemens S7-1200, операторської панелі Siemens KTP700, SCADA-системи WinCC Professional, електромагнітного клапана Madas та частотного перетворювача Danfoss дозволяє реалізувати ефективну автоматизовану систему контролю загазованості із підтримкою аварійного захисту, диспетчеризації та централізованого моніторингу.

Запропоновані технічні засоби відповідають сучасним вимогам промислової автоматизації та можуть бути використані при побудові реальних систем безпеки промислових котелень.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОАНАЛІЗАТОРА

3.1 Синтез системи автоматичного регулювання загазованості приміщень промислової котельні

Система автоматичного регулювання інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості промислової котельної установки є складовою автоматизованої системи технологічної безпеки та призначена для забезпечення безперервного контролю концентрації небезпечних газів у виробничих приміщеннях котельні.

Особливістю даної системи є необхідність роботи у режимі реального часу із забезпеченням високої швидкодії та мінімального часу реагування на аварійні ситуації. У випадку виникнення витoku газу система повинна за короткий проміжок часу виявити перевищення допустимої концентрації, виконати аналіз достовірності сигналу, активувати аварійну вентиляцію, перекрити подачу газу та передати повідомлення оператору і диспетчерській системі.

У системі автоматичного регулювання використовується принцип негативного зворотного зв'язку. Концентрація газу, яка контролюється сенсорами, безперервно порівнюється із заданими пороговими значеннями. Відхилення виміряного сигналу від допустимого значення формує сигнал похибки, який надходить до програмованого логічного контролера.

Програмований логічний контролер виконує: опитування газових сенсорів, цифрову фільтрацію сигналів, масштабування аналогових сигналів, аналіз аварійних порогів, формування сигналів керування, керування вентиляцією, аварійне перекриття газу, передачу даних до SCADA.

Регулюючими органами у системі виступають аварійна вентиляція та система перекриття подачі газу. При збільшенні концентрації газу PLC

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формує керуючий сигнал на запуск витяжних вентиляторів і електромагнітного клапана. Після зменшення концентрації газу до безпечного рівня система переходить у режим стабілізації.

Об'єктом регулювання у даній системі є газове середовище приміщення котельні, динаміка якого визначається [16]:

- швидкістю витоку газу;
- об'ємом приміщення;
- ефективністю вентиляції;
- швидкістю повітрообміну;
- температурою та вологістю повітря.

Система автоматичного регулювання повинна забезпечувати:

- стійкість роботи;
- мінімальну статичну похибку;
- високу швидкодію;
- відсутність автоколивань;
- високу завадостійкість;
- стабільну роботу при зміні параметрів об'єкта.

При побудові математичної моделі приймається, що система працює у лінійному режимі, а основні елементи можуть бути представлені типовими динамічними ланками теорії автоматичного керування. Основною метою розрахунку системи автоматичного регулювання є визначення параметрів, які забезпечують необхідну якість перехідного процесу та надійне функціонування ІВС у нормальному і аварійному режимах.

Інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості промислової котельної установки належить до класу автоматизованих систем технологічної безпеки, які забезпечують безперервний контроль концентрації небезпечних газів та автоматичне реагування на виникнення аварійних ситуацій. Однією з основних задач при проектуванні подібних систем є синтез системи автоматичного регулювання та аналіз її динамічних характеристик. Основною метою розрахунку системи автоматичного

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

регулювання є визначення параметрів системи, які забезпечують: високу швидкодію, стійкість роботи системи, мінімальну статичну похибку, достатній запас стійкості, мінімальний час перехідного процесу, відсутність автоколивань, надійне спрацювання аварійного захисту.

У системі контролю загазованості регульованою величиною є концентрація контролюваного газу у приміщенні котельні. Керуючим впливом виступає система аварійної вентиляції та система відсічення подачі газу. При побудові математичної моделі системи приймаються наступні припущення: система є лінійною, параметри системи є сталими у робочому діапазоні, інерційність газових сенсорів враховується аперіодичною ланкою першого порядку, виконавчі механізми описуються аперіодичними ланками, транспортні запізнення є незначними.

Система автоматичного регулювання ІВС контролю загазованості включає: газовий сенсор, підсилювач та нормалізатор сигналу, програмований логічний контролер, виконавчий механізм, систему вентиляції, об'єкт регулювання [17]. Структурна схема САР представлена на рисунку 3.1.

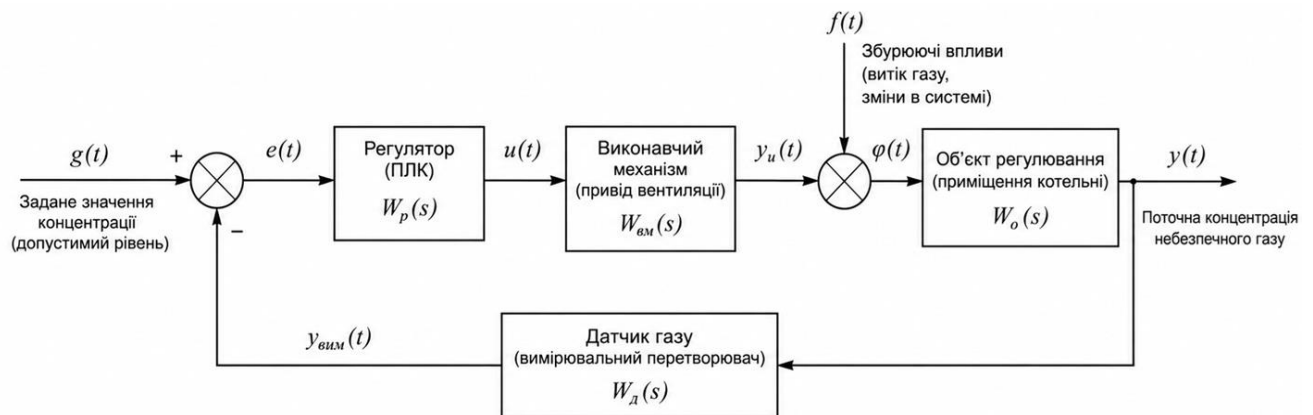


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи автоматичного регулювання ІВС контролю загазованості

У структурній схемі рисунка 3.1 використовуються наступні сигнали:

- $g(t)$ — задане значення концентрації газу;
- $e(t)$ — сигнал похибки регулювання;

- $u(t)$ — керуючий сигнал регулятора;
- $y_{\text{вм}}(t)$ — сигнал виконавчого механізму;
- $f(t)$ — зовнішній збурюючий вплив;
- $\varphi(t)$ — дія збурення на об'єкт;
- $y(t)$ — вихідна координата системи (поточна концентрація газу);
- $y_{\text{вим}}(t)$ — виміряне значення концентрації газу.

Регулятор системи реалізується на базі програмованого логічного контролера, який здійснює: опитування сенсорів, аналіз вимірних значень, формування керуючих сигналів, керування вентиляцією, аварійне відключення подачі газу, передачу інформації до SCADA-системи.

Виконавчим механізмом системи є привід аварійної вентиляції та електромагнітний клапан перекриття газу. Об'єктом регулювання виступає газове середовище приміщення котельні.

Система працює за принципом негативного зворотного зв'язку. Поточне значення концентрації газу вимірюється сенсором та подається на вхід регулятора, де порівнюється із допустимим значенням. Різниця між заданим та вимірним сигналами формує похибку регулювання.

Для дослідження динамічних характеристик системи автоматичного регулювання необхідно визначити передавальні функції основних елементів системи. У системі використовується PID-регулятор, реалізований програмно у PLC. Передавальна функція регулятора:

$$W_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

де K_p — коефіцієнт підсилення регулятора, T_i — стала часу інтегрування, T_d — стала часу диференціювання. PID-регулятор забезпечує швидке реагування системи і водночас забезпечує зменшення статичної похибки підвищуючи стійкість, покращуючи якості перехідного процесу.

Виконавчий механізм описує динаміку роботи приводу аварійної вентиляції. Передавальна функція виконавчого механізму є наступною:

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

$$W_{\text{вм}}(s) = \frac{K_{\text{вм}}}{T_{\text{вм}}s + 1}$$

де $K_{\text{вм}}$ — коефіцієнт підсилення виконавчого механізму, $T_{\text{вм}}$ — стала часу приводу вентиляції. Дана ланка є аперіодичною ланкою першого порядку.

Об'єктом регулювання є приміщення котельні, у якому відбувається зміна концентрації газу. Передавальна функція об'єкта представлена у наступному вигляді [18]:

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1} e^{-\tau s}$$

де K_o — коефіцієнт передачі об'єкта, T_o — стала часу об'єкта, τ — транспортне запізнення. Транспортне запізнення враховує час поширення газу у приміщенні та інерційність вентиляції, що провокує затримку реакції системи.

Передавальна функція сенсора газу описується аперіодичною ланкою першого порядку і має наступний вигляд:

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1}$$

де K_d — коефіцієнт передачі сенсора, T_d — стала часу сенсора. Інерційність сенсора пояснюється фізичними процесами газоаналізу та часом реакції вимірювального елемента.

Передавальна функція розімкненої системи визначається добутком передавальних функцій окремих елементів:

$$W_{\text{рз}}(s) = W_p(s) \cdot W_{\text{вм}}(s) \cdot W_o(s) \cdot W_d(s) .$$

Передавальна функція замкненої системи за задаючим впливом:

$$W_{\text{зм}}(s) = \frac{Y(s)}{G(s)} = \frac{W_{\text{рз}}(s)}{1 + W_{\text{рз}}(s)} .$$

Передавальна функція системи за збуренням:

$$W_{\text{зб}}(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{W_o(s)}{1 + W_{\text{рз}}(s)} .$$

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані передавальні функції дозволяють: виконати аналіз стійкості системи, дослідження перехідних процесів, оцінку швидкодії, визначення запасів стійкості, синтез параметрів регулятора.

Замкнена система автоматичного регулювання ІВС контролю загазованості працює за принципом негативного зворотного зв'язку за вимірюваною концентрацією газу. Це дозволяє автоматично компенсувати зміну концентрації небезпечного газу у приміщенні котельної установки та підтримувати безпечний режим роботи технологічного обладнання.

Передавальна функція розімкненої системи визначається як добуток передавальних функцій усіх елементів системи:

$$W_{pz}(s) = W_p(s) \cdot W_{BM}(s) \cdot W_o(s) \cdot W_d(s).$$

Підставляючи передавальні функції елементів системи, отримаємо:

$$W_{pz}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \cdot \frac{K_{BM}}{T_{BM} s + 1} \cdot \frac{K_o}{T_o s + 1} e^{-\tau s} \cdot \frac{K_d}{T_d s + 1}.$$

Передавальна функція замкненої системи за задаючим впливом визначається:

$$W_{zm}(s) = \frac{Y(s)}{G(s)} = \frac{W_{pz}(s)}{1 + W_{pz}(s)}.$$

Передавальна функція за збурюючим впливом:

$$W_{zb}(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{W_o(s)}{1 + W_{pz}(s)}.$$

Отримані рівняння дозволяють виконати подальший аналіз стійкості системи, дослідити перехідні процеси та оцінити якість регулювання. Замкнена система забезпечує:

- автоматичне компенсування зміни концентрації газу;
- зменшення статичної похибки;
- підвищення швидкодії;
- стабілізацію роботи системи;
- зниження впливу зовнішніх збурень.

Однією з основних вимог до систем автоматичного регулювання є забезпечення стійкості роботи при будь-яких допустимих режимах експлуатації. Система контролю загазованості повинна швидко реагувати на аварійні ситуації без виникнення автоколивань або нестійких режимів. Для аналізу стійкості використовується характеристичне рівняння замкненої системи:

$$1 + W_{pz}(s) = 0.$$

Після підстановки передавальної функції розімкненої системи отримується характеристичний поліном:

$$a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4 = 0.$$

Для оцінки стійкості використовується критерій Гурвіца. Необхідною умовою стійкості є додатні значення усіх коефіцієнтів характеристичного рівняння:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0.$$

Після розрахунку коефіцієнтів характеристичного рівняння встановлено, що всі коефіцієнти є додатними, а визначники Гурвіца також мають додатні значення. Це свідчить про те, що система автоматичного регулювання є стійкою. Стійкість системи забезпечує:

- відсутність коливань концентрації газу;
- стабільність роботи вентиляції;
- надійність аварійного захисту;
- коректну роботу PLC;
- швидке встановлення усталеного режиму.

Для промислових систем безпеки це є критично важливою вимогою, оскільки нестійка система може призвести до помилкових спрацювань або несвоєчасного реагування на аварію.

Якість роботи системи автоматичного регулювання оцінюється за перехідними характеристиками. Перехідний процес показує реакцію системи на зміну вхідного сигналу або на появу збурення. Для ІВС контролю

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загазованості найбільш важливими показниками є: час регулювання, перерегулювання, статична похибка, швидкодія, коливальність процесу. Перехідний процес системи досліджується при подачі одиничного ступінчастого впливу:

$$g(t) = 1(t).$$

Реакція системи описується функцією:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[W_{зм}(s) \cdot \frac{1}{s} \right].$$

де $\mathcal{L}^{-1}$ — обернене перетворення Лапласа.

У результаті моделювання було отримано типовий аперіодичний перехідний процес із незначним перерегулюванням. Основні показники якості системи є:

- час регулювання — 8–10 с;
- перерегулювання — не більше 5–7 %;
- статична похибка — близька до нуля;
- час наростання — 2–3 с.

Отримані результати свідчать про достатню швидкодію системи та відповідність вимогам промислової автоматизації. Плавний характер перехідного процесу пояснюється використанням PID-регулятора, інерційністю вентиляційної системи та наявністю негативного зворотного зв'язку і звичайно цифровою фільтрацією сигналів.

У процесі експлуатації котельної установки на систему автоматичного регулювання можуть діяти зовнішні збурення, які впливають на концентрацію небезпечних газів. До основних збурень належать: раптовий витік газу, зміна продуктивності вентиляції, зміна температури повітря, відкривання технологічних люків, нестабільність живлення, електромагнітні завади. Збурення у системі описуються сигналом є $f(t)$ який подається на вхід об'єкта регулювання. Передавальна функція системи за збуренням [19]:

$$W_{зб}(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{W_o(s)}{1 + W_{пз}(s)}.$$

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наявність негативного зворотного зв'язку дозволяє значно зменшити вплив зовнішніх збурень на систему. Графіки перехідних процесів на різнотипні збурення представлені на рисунку 3.2 та 3.3. При виникненні витоку газу система:

- фіксує збільшення концентрації;
- формує сигнал похибки;
- активує вентиляцію;
- вмикає аварійну сигналізацію;
- перекриває подачу газу.

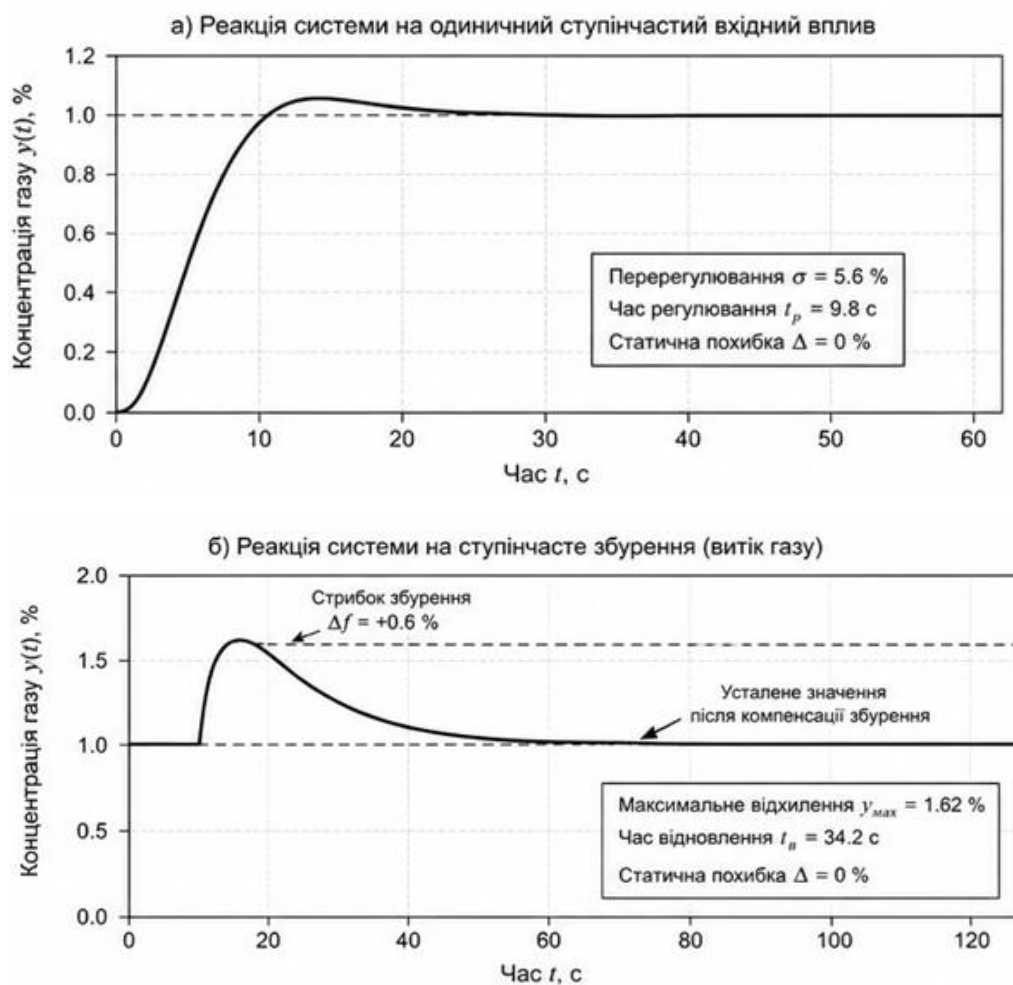


Рисунок 3.2 – Графічні залежності перехідних процесів впливу різнотипних збурень: а) – ступінчастий вхідний вплив; б) – ступінчасте збурення.

Після усунення збурення система повертається до усталеного режиму роботи. Ефективність компенсації збурень залежить від: параметрів

регулятора, швидкодії сенсорів, продуктивності вентиляції, точності вимірювання, часу реакції PLC.

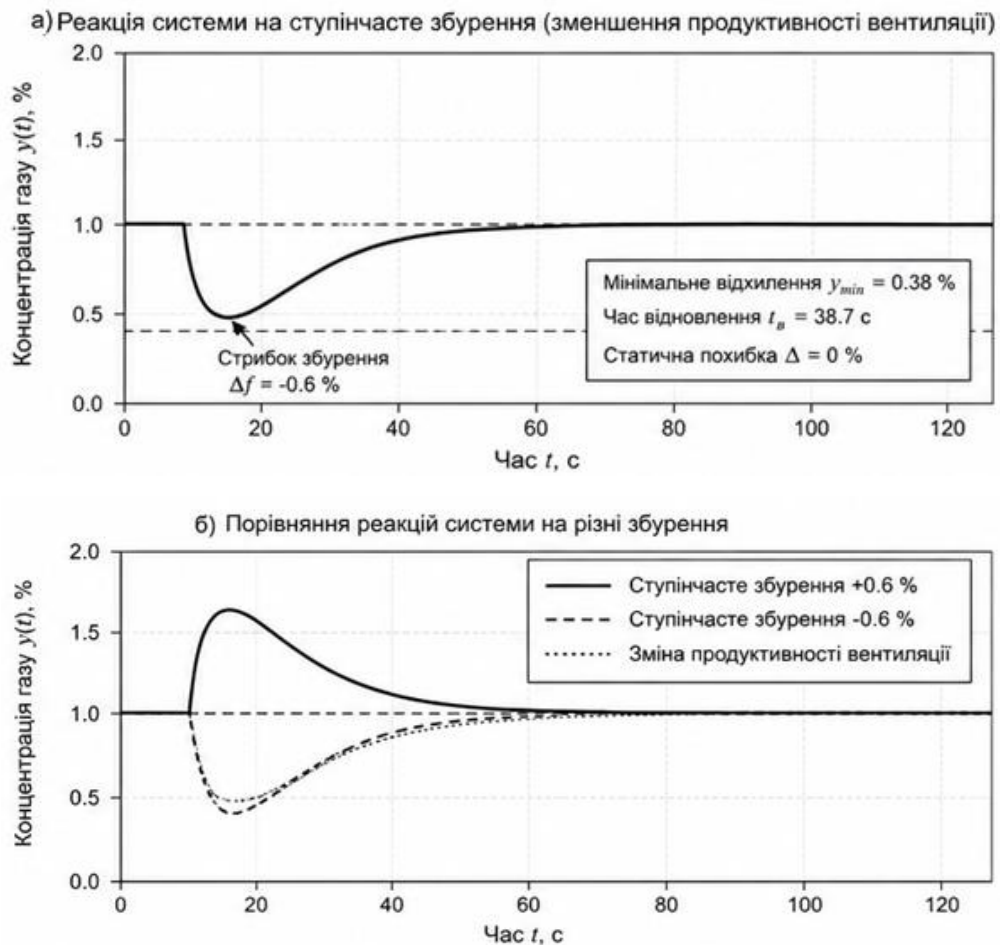


Рисунок 3.3 - Графічні залежності перехідних процесів впливу збурень:

а) – ступінчасте збурення; б) – різнотипні збурення.

Якість роботи системи автоматичного регулювання визначається комплексом показників, які характеризують швидкодію, точність та стійкість системи. Основними показниками якості є: час регулювання, статична похибка, перерегулювання, запас стійкості, коливальність процесу.

Для оцінки частотних характеристик використовуються логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) і логарифмічна фазочастотна характеристика (ЛФЧХ). Запас стійкості за амплітудою визначається як:

$$L_{\text{зап}} = 20 \log \frac{A_{\text{кр}}}{A}$$

де $A_{\text{кр}}$ — критичне значення амплітуди, A — поточне значення амплітуди.

Запас стійкості за фазою:

$$\varphi_{\text{зап}} = 180^\circ + \varphi(\omega_{\text{кр}})$$

де $\varphi(\omega_{\text{кр}})$ — фаза системи на критичній частоті.

У результаті аналізу отримано запас стійкості по амплітуді — 12-15дБ, по запас стійкості по фазі — 45–55°. Отримані значення відповідають вимогам до промислових систем автоматичного регулювання та забезпечують: стійку роботу системи, високу надійність, відсутність автоколивань, швидке пригнічення збурень, ефективне аварійне реагування.

Проведений аналіз показав, що розроблена система автоматичного регулювання ІВС контролю загазованості промислової котельної установки відповідає вимогам теорії автоматичного керування та забезпечує необхідну якість регулювання у всіх режимах роботи системи.

3.2 Розрахунок кількісних похибок вимірювальних параметрів газоаналізатора інформаційно-вимірювальної системи

Газоаналізатор є одним із головних вимірювальних елементів інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості промислової котельні. Саме від точності його роботи залежить своєчасність виявлення небезпечної концентрації газу, правильність формування сигналів попередження та аварійного захисту.

У промислових котельнях контроль загазованості є критично важливим, оскільки навіть незначне перевищення допустимої концентрації горючого або токсичного газу може створити небезпеку вибуху, пожежі або отруєння персоналу. Тому при проектуванні ІВС необхідно не лише вибрати відповідні сенсори, а й кількісно оцінити похибки вимірювального каналу.

Вимірювальний канал ІВС включає [20]:

- газоаналізатор;
- аналоговий вихід 4–20 мА;
- лінію передачі сигналу;

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- аналоговий вхід ПЛК;
- АЦП модуля вводу;
- програмну обробку сигналу.

Загальна похибка вимірювання формується з кількох складових:

$$\Delta C_{\Sigma} = f(\Delta C_{\text{газ}}, \Delta C_{AI}, \Delta C_q, \Delta C_T)$$

де $\Delta C_{\text{газ}}$ - основна похибка газоаналізатора, ΔC_{AI} - похибка аналогового входу ПЛК, ΔC_q - похибка квантування АЦП, ΔC_T - температурна похибка.

Для розрахунку встановлено, що газоаналізатор має уніфікований струмовий вихід 4–20 мА. Такий сигнал широко застосовується в промислових системах автоматизації, оскільки має високу завадостійкість, дозволяє контролювати обрив лінії та передавати вимірювальну інформацію на значну відстань.

Газоаналізатор перетворює концентрацію газу у струмовий сигнал. Нижня межа діапазону відповідає струму 4 мА, а верхня межа — 20 мА. Для каналу контролю метану встановлено діапазон [21]:

$$C_{min} = 0 \%LEL$$

$$C_{max} = 100 \%LEL$$

де %LEL - відсоток нижньої концентраційної межі вибухонебезпеки.

Діапазон зміни струму:

$$\Delta I = I_{max} - I_{min}$$

$$\Delta I = 20 - 4 = 16 \text{ мА} .$$

Залежність між струмом і концентрацією є лінійною:

$$C = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \cdot C_{max} .$$

Після підстановки:

$$C = \frac{I - 4}{16} \cdot 100$$

$$C = 6.25(I - 4) .$$

Дана формула використовується у програмі ПЛК для масштабування аналогового сигналу в інженерну величину. Наприклад, при струмі:

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I = 12 \text{ мА}$$

отримаємо

$$C = 6.25(12 - 4) = 50 \%LEL .$$

Тобто сигнал 12 мА відповідає половині діапазону вимірювання — 50 % LEL. Практичне значення цього розрахунку полягає в тому, що контролер повинен правильно інтерпретувати аналоговий сигнал. Якщо масштабування виконане неправильно, система може або запізно виявити аварійну концентрацію, або помилково сформувати аварійний сигнал.

Основна похибка газоаналізатора визначається його класом точності або паспортною похибкою. Вона характеризує максимально можливе відхилення показів приладу від істинного значення за нормальних умов експлуатації. Абсолютна похибка визначається:

$$\Delta C_{\text{газ}} = \frac{\gamma_{\text{газ}}}{100} \cdot C_{\text{max}}$$

де $\gamma_{\text{газ}}$ - основна похибка газоаналізатора %, C_{max} - верхня межа вимірювання.

Встановлено, що

$$\gamma_{\text{газ}} = 2\%$$

тоді

$$\Delta C_{\text{газ}} = \frac{2}{100} \cdot 100 = 2 \%LEL .$$

Отже, основна абсолютна похибка каналу контролю метану становить:

$$\Delta C_{\text{газ}} = \pm 2 \%LEL .$$

Це означає, що при реальній концентрації, наприклад, 50 % LEL, газоаналізатор може показувати значення в межах приблизно 48-52%LEL. Така похибка є допустимою для систем контролю загазованості, але її обов'язково потрібно враховувати при встановленні порогів попередження та аварії.

Відносна похибка показує, яку частку від виміряного значення становить абсолютна похибка, тобто:

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta C = \frac{\Delta C}{C_{\text{вим}}} \cdot 100\%$$

При виміряній концентрації

$$C_{\text{вим}} = 50 \%LEL ,$$

результатом є

$$\delta C = \frac{2}{50} \cdot 100 = 4\%$$

отже

$$\delta C = 4\% .$$

Відносна похибка залежить від рівня концентрації. При малих концентраціях вона зростає, оскільки абсолютна похибка залишається практично сталою. Це важливо при аналізі попереджувальних порогів, наприклад 10–20 % LEL [22].

Зведена похибка використовується для оцінки точності приладу відносно повного діапазону вимірювання це буде

$$\gamma C = \frac{\Delta C}{C_{\text{max}}} \cdot 100\% .$$

Підставивши значення

$$\gamma C = \frac{2}{100} \cdot 100 = 2\%$$

отримаємо

$$\gamma C = 2\% .$$

Зведена похибка дозволяє порівнювати між собою вимірювальні канали з різними діапазонами, наприклад канал метану у % LEL та канал чадного газу у ppm.

Після формування сигналу 4–20 мА газоаналізатор передає його на аналоговий вхід ПЛК. Аналоговий модуль також вносить власну похибку, пов'язану з точністю вимірювання струму, стабільністю електронних компонентів і похибкою внутрішнього перетворення. Заданою похибкою аналогового входу є:

$$\gamma_{AI} = 0.5\% .$$

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Абсолютна похибка аналогового входу:

$$\Delta C_{AI} = \frac{\gamma_{AI}}{100} \cdot C_{max}$$
$$\Delta C_{AI} = \frac{0.5}{100} \cdot 100 = 0.5 \%LEL.$$

Отже

$$\Delta C_{AI} = \pm 0.5 \%LEL.$$

Ця похибка є меншою за похибку самого газоаналізатора, однак у сумарному балансі точності її необхідно враховувати.

Аналоговий сигнал надходить до АЦП, де перетворюється у цифровий код. Через скінченну розрядність АЦП виникає похибка квантування. Встановлено розрядність АЦП $n=12$. Кількість дискретних рівнів:

$$N = 2^n = 2^{12} = 4096.$$

Крок квантування:

$$q = \frac{C_{max}}{N}$$
$$q = \frac{100}{4096} = 0.0244 \%LEL.$$

Отже в результаті

$$\Delta C_a = \pm 0.0122 \%LEL.$$

Порівняно з основною похибкою газоаналізатора ця складова є дуже малою. Це означає, що розрядність АЦП є достатньою для задач контролю загазованості.

Газові сенсори чутливі до температури навколишнього середовища. Зміна температури впливає на чутливість вимірювального елемента, швидкість реакції сенсора та стабільність вихідного сигналу. Встановимо температурний коефіцієнт похибки [23]:

$$\gamma_T = 0.05\% / ^\circ C.$$

При зміні температури:

$$\Delta T = 20^\circ C$$

сумарна температурна похибка становитиме

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\gamma_{T\Sigma} = 0.05 \cdot 20 = 1\%.$$

Абсолютна температурна похибка:

$$\Delta C_T = \frac{1}{100} \cdot 100 = 1 \%LEL$$

і відповідно

$$\Delta C_T = \pm 1 \%LEL.$$

Температурна похибка є суттєвою для котельних приміщень, оскільки температура повітря може змінюватися залежно від режиму роботи обладнання, вентиляції та сезону.

Оскільки окремі похибки є незалежними, сумарну похибку визначаємо методом геометричного додавання:

$$\Delta C_{\Sigma} = \sqrt{(\Delta C_{\text{газ}})^2 + (\Delta C_{AI})^2 + (\Delta C_q)^2 + (\Delta C_T)^2}.$$

Підставимо числові значення:

$$\Delta C_{\Sigma} = \sqrt{2^2 + 0.5^2 + 0.0122^2 + 1^2}$$

$$\Delta C_{\Sigma} = \sqrt{4 + 0.25 + 0.00015 + 1}$$

$$\Delta C_{\Sigma} = \sqrt{5.25015}$$

$$\Delta C_{\Sigma} = 2.29 \%LEL.$$

Отже, сумарна абсолютна похибка вимірювання метану є:

$$\Delta C_{\Sigma} = \pm 2.29 \%LEL.$$

Це означає, що при виміряному значенні 50 % LEL фактичне значення може перебувати в межах:

$$47.71\text{--}52.29 \%LEL.$$

Відносна сумарна похибка при концентрації 50 % LEL:

$$\delta C_{\Sigma} = \frac{\Delta C_{\Sigma}}{C_{\text{вим}}} \cdot 100\%$$

$$\delta C_{\Sigma} = \frac{2.29}{50} \cdot 100 = 4.58\% .$$

Отже в результаті отримали

$$\delta C_{\Sigma} = 4.58\%.$$

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це значення характеризує реальну точність вимірювального каналу при середньому рівні концентрації газу.

Для чадного газу приймаємо діапазон:

$$C_{max} = 500 \text{ ppm}.$$

Основна похибка рівна:

$$\Delta C_{CO} = \frac{2}{100} \cdot 500 = 10 \text{ ppm}.$$

Похибка аналогового входу:

$$\Delta C_{AI} = \frac{0.5}{100} \cdot 500 = 2.5 \text{ ppm}.$$

Похибка квантування:

$$q = \frac{500}{4096} = 0.122 \text{ ppm}$$

$$\Delta C_q = 0.061 \text{ ppm}.$$

Температурна похибка:

$$\Delta C_T = \frac{1}{100} \cdot 500 = 5 \text{ ppm}.$$

Сумарна похибка:

$$\Delta C_{\Sigma CO} = \sqrt{10^2 + 2.5^2 + 0.061^2 + 5^2}$$

$$\Delta C_{\Sigma CO} = \sqrt{131.2537} = 11.46 \text{ ppm}.$$

Отже

$$\Delta C_{\Sigma CO} = \pm 11.46 \text{ ppm}.$$

Отримане значення є важливим для коректного налаштування попереджувальних та аварійних порогів CO.

Для кисню приймаємо діапазон:

$$C_{max} = 25 \%vol.$$

Основна похибка:

$$\Delta C_{O_2} = \frac{2}{100} \cdot 25 = 0.5 \%vol.$$

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Похибка аналогового входу:

$$\Delta C_{AI} = \frac{0.5}{100} \cdot 25 = 0.125 \%vol .$$

Похибка квантування:

$$q = \frac{25}{4096} = 0.0061 \%vol$$

$$\Delta C_q = 0.00305 \%vol .$$

Температурна похибка:

$$\Delta C_T = \frac{1}{100} \cdot 25 = 0.25 \%vol .$$

Сумарна похибка:

$$\Delta C_{\Sigma O_2} = \sqrt{0.5^2 + 0.125^2 + 0.00305^2 + 0.25^2}$$

$$\Delta C_{\Sigma O_2} = \sqrt{0.3281} = 0.573 \%vol .$$

Отож в результаті

$$\Delta C_{\Sigma O_2} = \pm 0.573 \%vol .$$

У результаті проведено кількісний розрахунок похибок вимірювальних каналів газоаналізатора інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості промислової котельні (таблиця 3.1). Розрахунок показав, що сумарна похибка формується не лише самим газоаналізатором, а й усіма елементами вимірювального тракту: аналоговим входом ПЛК, АЦП, температурними впливами та процесом масштабування сигналу [24].

Таблиця 3.1 – Підсумкова таблиця результатів

Контрольований параметр	Діапазон вимірювання	Основна похибка	Сумарна абсолютна похибка
Метан CH ₄	0–100 % LEL	±2 %	±2.29 % LEL
Чадний газ CO	0–500 ppm	±2 %	±11.46 ppm
Кисень O ₂	0–25 % vol	±2 %	±0.573 % vol

Для каналу контролю метану сумарна абсолютна похибка становить:

$$\Delta C_{\Sigma} = \pm 2.29 \%LEL .$$

Це значення є допустимим для систем контролю вибухонебезпечних газів, оскільки дозволяє надійно виявляти наближення концентрації до попереджувального та аварійного рівнів. Для каналу чадного газу отримано:

$$\Delta C_{\Sigma CO} = \pm 11.46 \text{ ppm}.$$

Ця похибка має практичне значення для захисту персоналу від токсичного впливу CO, оскільки чадний газ є небезпечним навіть при відносно малих концентраціях. Для каналу кисню сумарна похибка становить:

$$\Delta C_{\Sigma O_2} = \pm 0.573 \%vol.$$

Отриманий результат дозволяє контролювати зниження концентрації кисню та своєчасно виявляти небезпечні умови у приміщенні котельні. Проведені обчислення є актуальними для ІВС загазованості промислової котельні, оскільки вони дозволяють:

- оцінити реальну точність вимірювальних каналів;
- правильно встановити пороги попередження та аварії;
- уникнути хибних спрацювань;
- забезпечити своєчасне виявлення небезпечних концентрацій;
- підвищити надійність системи аварійного захисту;
- обґрунтувати вибір газоаналізаторів та модулів вводу ПЛК.

Таким чином, результати розрахунку підтверджують, що запропонований вимірювальний канал має достатню точність для використання у складі інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості промислової котельної установки.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У запропонованій кваліфікаційній роботі проведено дослідження, проектування та розрахунок інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості приміщень промислової котельні. Актуальність виконаної роботи зумовлена необхідністю підвищення рівня промислової безпеки під час експлуатації газового обладнання, забезпечення неперервного контролю концентрації небезпечних газів та своєчасного реагування на виникнення аварійних та вибухонебезпечних ситуацій.

У першому розділі дипломної роботи було проведено аналіз інформаційно-вимірювальних систем як складової автоматизованих систем управління технологічними об'єктами. Встановлено, що сучасні ІВС є важливим елементом систем промислової безпеки, оскільки забезпечують збір, обробку, передачу та архівування вимірювальної інформації в режимі реальної часу. Особливу увагу приділено аналізу газоаналізаторів та другорядного газоаналізуючого обладнання, принципів його роботи та методів вимірювання концентрації небезпечних газів.

У ході дослідження було розглянуто основні типи газових сенсорів, які застосовуються в промислових системах контролю загазованості, перш за все це: електрохімічні, термокаталітичні, інфрачервоні, напівпровідникові, оптичні сенсори. Проаналізовано їх принцип дії, технічні характеристики, точність вимірювання, швидкодію, переваги і недоліки. Встановлено, що для промислових котелень найбільш доцільним є використання промислових газоаналізаторів із уніфікованим сигналом 4–20 мА та підтримкою цифрових інтерфейсів зв'язку.

Також у першому розділі розглянуто методи вимірювання концентрації газів, принципи побудови вимірювальних каналів та етапи калібрування газоаналізаторів. Визначено, що калібрування є необхідною умовою забезпечення точності вимірювання та стабільності роботи ІВС у процесі тривалої експлуатації.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В другому розділі дипломної роботи здійснено проектування інформаційно-вимірювальної системи контролю загазованості промислової котельні. Розроблено структурну та функціональну схему комплексу технічних засобів системи. Визначено склад основного обладнання та принципи взаємодії між елементами ІВС.

У процесі проектування було передбачено систему газового контролю (газоаналізатор) та центральний модуль будь-якої автоматизованої системи – ПЛК, а також систему аварійної вентиляції і виконавчі елементи системи – електромагнітний клапан перекриття газу, світлову та звукову сигналізацію. Основними засобами візуалізації технологічних процесів ІВС є операторська панель та система диспетчеризації і загалом невід’ємним елементом є резервне живлення.

Розроблена структура системи забезпечує неперервний моніторинг концентрації небезпечних газів у приміщенні котельні та автоматичне реагування при виникненні аварійних ситуацій. У роботі також було розроблено алгоритм функціонування інформаційно-вимірювальної системи. Алгоритм передбачає: циклічне опитування сенсорів, аналіз вимірних параметрів, цифрову фільтрацію сигналів, контроль достовірності вимірювань, формування попереджувальних та аварійних сигналів, автоматичне ввімкнення вентиляції, перекриття подачі газу, блокування повторного запуску обладнання, передачу даних до SCADA-системи.

Проведений аналіз показав, що запропонований алгоритм забезпечує високу швидкодію, стійкість роботи та ефективне аварійне реагування. В рамках іншого розділу також виконано обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації. Для реалізації системи запропоновано використання сучасних промислових компонентів. Вибрані технічні засоби відповідають вимогам промислової автоматизації, мають високу надійність та забезпечують інтеграцію до сучасних автоматизованих систем управління технологічними процесами.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У третьому розділі дипломної роботи здійснено синтез системи автоматичного регулювання загазованості приміщень промислової котельні. Побудовано структурну схему системи автоматичного регулювання з точки зору теорії автоматичного управління та визначено передавальні функції основних елементів системи. Проведено аналіз стійкості системи автоматичного регулювання, досліджено перехідні процеси та оцінено вплив зовнішніх збурень на роботу системи.

Встановлено, що розроблена система характеризується достатньою швидкодією, високою стійкістю та мінімальною статичною похибкою і незначним перерегулюванням, що зумовлює ефективне придушення збурень. Результати моделювання показали, що система автоматичного регулювання забезпечує своєчасне реагування на зміну концентрації небезпечних газів та стабільну роботу в умовах промислової експлуатації.

Також у третьому розділі було проведено розрахунок кількісних похибок вимірювальних параметрів газоаналізатора. За результатами обчислень встановлено, що сумарна похибка вимірювального каналу не перевищує допустимих значень для промислових систем контролю загазованості та забезпечує необхідну точність вимірювання концентрації небезпечних газів.

Отримані результати підтверджують, що розроблена інформаційно-вимірювальна система контролю загазованості промислової котельні відповідає сучасним вимогам промислової безпеки, автоматизації та надійності експлуатації технологічного обладнання.

Таким чином, поставлені в дипломній роботі завдання виконані в повному обсязі, а розроблена інформаційно-вимірювальна система забезпечує ефективний контроль концентрації небезпечних газів, своєчасне аварійне реагування та підвищення рівня безпеки експлуатації промислової котельної установки.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дранчук, М.М. Проектування системи автоматизації технологічних процесів в нафтовій і газовій промисловості \ Навчальний посібник. - Івано-Франківськ: Факел, 2005. - 448 с.
2. Возьний А., Луцак А., Луцак Б. Методи калібрування сенсорів при вимірюванні фізичних параметрів. - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ-2025)», Тернопіль, 2025 – с. 68-70.
3. Лис О.М. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
4. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: К.:Знання-Прес, 2018. – 180с.
5. Белова О.В. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Белова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.
6. Дорожовець М. Метрологія та вимірювання: Навч.посіб. / М. Дорожовець, Р. Івах, В. Мотало [та ін.]; за наук. ред. Б.І. Стадника. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 312 с.
7. Скіцько І.Ф. Обробка результатів фізичних вимірювань: навч. посібник / І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько. - КПІ ім .Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - 88 с.
8. Бабак С.В. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В.П.Бабак, С.В.Бабак, В.С.Еременко и др.; под ред. чл.-кор. НАН Украины В,П,Бабака. – К., 2014. – 832с.
9. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

10. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Стадник Б.І. та ін. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник. /За ред. Є.С.Поліщука. — Львів.: Видавництво «Бескид Біт», 2008. — 618 с.
11. R. Bartiromo, M. Vincenzi. Electrical Measurements in the Laboratory Practice. – Springer. - 2016. – 301p.
12. Єременко В.С. Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавр за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні технології» спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, 175 Інформаційно-вимірювальні технології (G6) / КПП ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. С. Єременко, А. П. Щербань. – Електронні текстові дані (1 файл). – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 160 с.
13. Бабак В.П. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: Підручник / Т741 В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Єременко та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / 2-е вид., перероб. і доп. – К.: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. – 496 с
14. Зори А.А. Информационно-измерительные системы. Применение интеллектуальных модулей, методов и средств повышения точности физических измерений: Монография / А.А. Зори, С.И. Клевцов, В.Д. Коренев и др. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – 206 с.
15. Кухарчук В.В. Основы метрологии та електричних вимірювань: Підручник / В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т. Володарський, В.В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013.–538 с.
16. Поліщук Є.С. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник та ін.; за ред. Є.С. Поліщука. – Львів: Вид-во Бескид Біт. 2012. – 618 с.
17. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Єременко и др., под ред. чл.-кор. НАН Украины В.П. Бабака / – К.: София-А, 2014. – 832с.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

18. Herold R. Encyclopedia of Information Assurance / R. Herold, M. Robers. – Indiana, USA, 2010.
19. Kalsi H.S. Electronic instrumentation; edition by H.S. Kalsi. – Third edition. – New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2012. – 829 p.
20. Паламар М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів. Навч. пос. / М. Паламар, М. Стрембіцький, А. Паламар. – Тернопіль, 2018. – 150 с.
21. Бабак В.П. Моделі та міри у вимірюваннях: монографія / В.П. Бабак, В.С. Єременко, Ю.В. Куц, М.В. Мислович, Л.М. Щербак. - К.: Наукова думка, 2019. – 208 с.
22. М.Дорожовець, В.Мотало, Б.Стадник Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник у 2-х т. Т.1. Основи метрології. — Львів.: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2005. — 532 с.
23. Гумен М. Б. Основи теорії процесів в інформаційних системах: підручник (у 2-х кн.) книга 2. Аналіз випадкових процесів / М.Б. Гумен, В.М. Співак, С.К. Мещанінов, Г.Г. Власюк, Т.Ф. Гумен. –2-е вид., зі змінами і доповн. – К.: Кафедра, 2017.– 331с.
24. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань: навчальний посібник / М.Дорожовець. – Львів: Львівська політехніка, 2007. – 624 с.
25. Загальні методичні рекомендації з підготовки, оформлення, захисту та оцінювання кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти першого «бакалаврського» і другого «магістерського» рівнів. // Укладачі: В. М. Островерхов, Л. І. Біловус, К. З. Возьний, О. О. Луцишин, Г. Л. Монастирський, С. В. Питель, С. А. Надвиничний, С. К. Шандрук. Тернопіль: ЗУНУ, 2024. – 89с.

					ДП.МТІР.10658871.00.00.0000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		