

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та управління проєктами
Кафедра інформаційних управляючих систем та технологій

"Допущений до захисту"

Завідувач кафедри ІУСТ

к.т.н, доц. Михелєв І.Л.



" ____ " _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти "магістр"

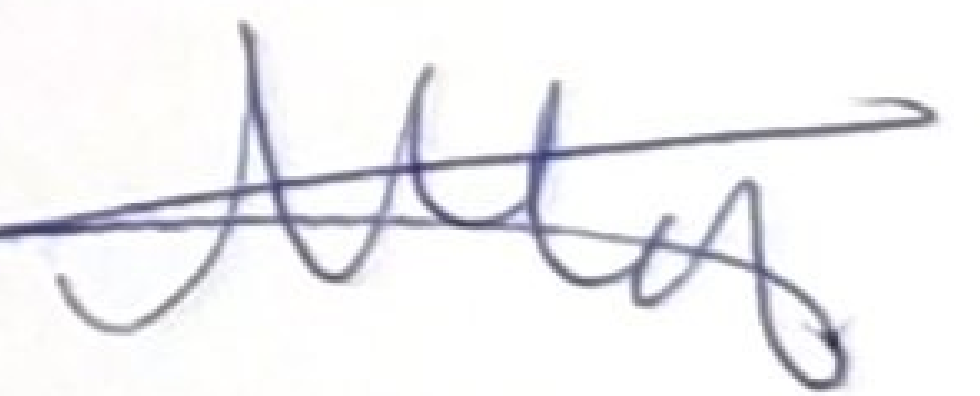
зі спеціальності 101 «Екологія»

**на тему: МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ВИКИДІВ ПРОДУКТІВ ЦЕМЕНТНОГО
ВИРОБНИЦТВА В АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ТА РОЗРОБКА ІС
МОНІТОРИНГУ**

Виконав: студент групи 6181 м

Куrowsька Вероніка Романівна

(підпис)



Керівник роботи:

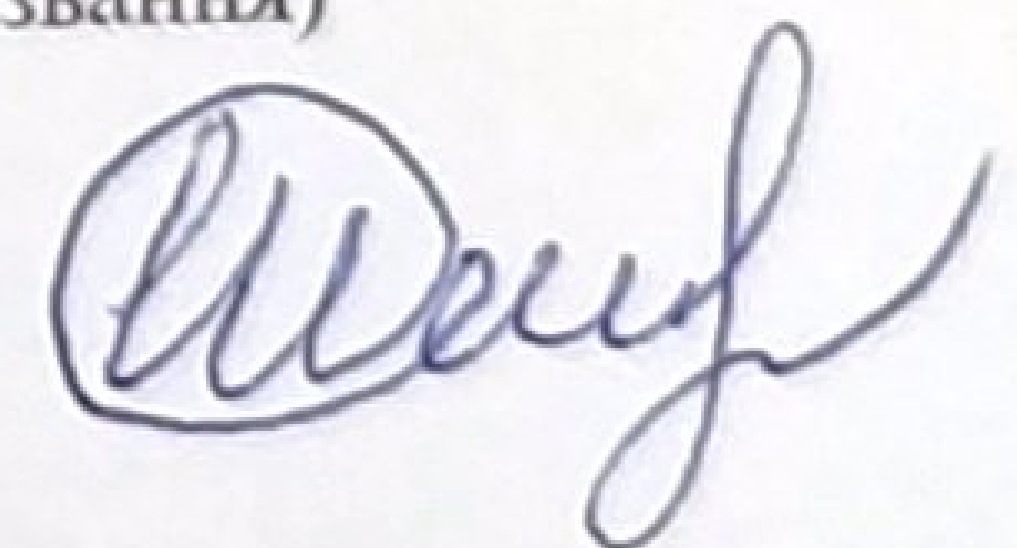
доцент кафедри екології та
природоохоронних технологій, к.т.н.,

ДОЦЕНТ

(посада, науковий ступінь вчене звання)

Магась Наталія Іванівна

(підпис)



м. Миколаїв – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та управління проектами
Кафедра інформаційних управляючих систем та технологій
Спеціальність 101 "Екологія"
Освітня програма "Комп'ютерний еколого-економічний моніторинг"

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Гарант освітньої програми
к.т.н, доц. Мельничук С.С.
" — " _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти "магістр"

Студенту Куровській Вероніці Романівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: методи контролю викидів продуктів цементного виробництва в атмосферне повітря та розробка ІС моніторингу

Керівник роботи Магась Наталія Іванівна, к.т.н., доцент

Затверджені наказом ректора № 1355-уч. від "14" листопада 2025 року.

2. Термін подання роботи: 15 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) ДСТУ щодо обробки інформації, літературні джерела, технічна документація на існуючі аналоги систем, матеріали наукового стажування

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

Дослідження моніторингових систем для визначення концентрацій забруднюючих речовин на цементному виробництві та аналіз предметної області, проектування системи онлайн-моніторингу викидів, розрахунки викидів та розробка програмного забезпечення системи моніторингу, техніко-економічне обґрунтування впровадження системи онлайн-моніторингу викидів, охорона праці та безпека життєдіяльності в процесі екологічного моніторингу.

5. Перелік презентаційних матеріалів Презентація – 15 аркушів

6. Консультанти розділів роботи

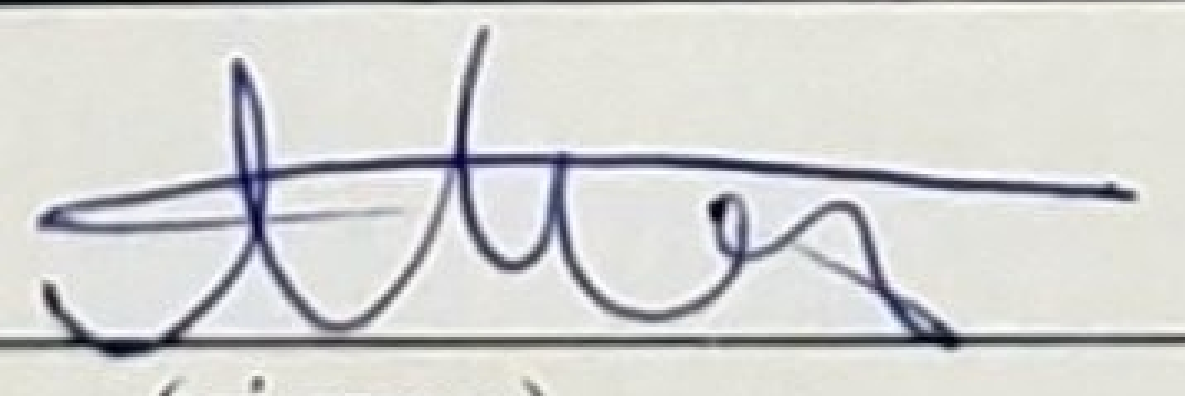
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Павленко А.Ю.	05.09.2024	22.12.2024
2	Гайдаєнко О.В.	23.12.2024	15.06.2025
3	Павленко А.Ю.	15.06.2025	25.09.2025
4	Павленко А.Ю.	25.09.2025	14.11.2025
5	Павленко А.Ю.	25.09.2025	14.11.2025

7. Дата видачі завдання 05 вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

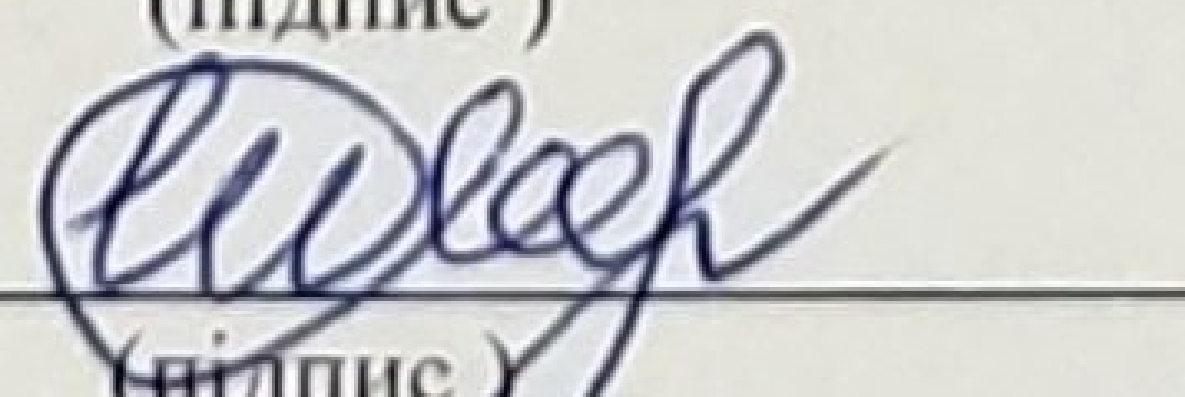
№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження та аналіз предметної галузі	22.12.2024	
2	Розробка концепції	15.03.2025	
3	Розділ з розробки проектних рішень по системі (та її частинах)	15.06.2025	
4	Реалізація проекту та розробка робочої документації	25.09.2025	
5	Обчислення економічної ефективності	14.11.2025	
6	Вирішення питань охорони праці та навколишнього середовища	14.11.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	14.11.2025	
8	Подання магістерської роботи на перевірку на плагіат	16.11.2025	
9	Подання магістерської роботи рецензенту	20.11.2025	
10	Подання магістерської роботи на державний захист	15.12.2025	

Студент


(підпис)

Куровська В.Р.
(ПІБ)

Керівник роботи


(підпис)

Магась Н.І.
(ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Анотація: Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню методів контролю викидів цементного виробництва в атмосферне повітря та розробці інформаційної системи моніторингу. Проведено аналіз методів контролю викидів, включаючи традиційні методи періодичного контролю, системи онлайн-моніторингу та математичне моделювання. Обґрунтовано вибір автоматизованого онлайн-моніторингу для безперервного контролю концентрацій забруднюючих речовин.

Розроблено трирівневу архітектуру інформаційної системи та спроектовано логічну і фізичну моделі бази даних. Створено математичні моделі розрахунку масових викидів та алгоритми виявлення аномалій у даних. Система забезпечує безперервний контроль якості атмосферного повітря, автоматичне формування звітності та оповіщення про перевищення нормативів.

Ключові слова: методи контролю викидів, атмосферне повітря, цементне виробництво, інформаційна система моніторингу, база даних.

Annotation: The master's thesis investigates emission control methods for cement production and develops a monitoring information system. The work analyzes control methods including traditional periodic control, online monitoring systems, and mathematical modeling. The selection of automated online monitoring for continuous pollutant concentration control is justified.

A three-tier information system architecture has been developed and logical and physical database models have been designed. Mathematical models for calculating mass emissions and algorithms for anomaly detection have been created. The system provides continuous atmospheric air quality monitoring, automatic reporting, and notifications of regulatory exceedances.

Keywords: emission control methods, atmospheric air, cement production, monitoring information system, database.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ МОНІТОРИНГОВИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НА ЦЕМЕНТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ТА АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	8
1.1 Аналіз предметної області на прикладі цементного заводу	8
1.1.2 Опис організаційної структури філії цементного заводу	14
1.2 Огляд методів моніторингу забруднень, що застосовуються на виробництві	18
1.3 Альтернативні підходи до вимірювання викидів на виробництві	21
1.3.1 Онлайн-моніторинг викидів	22
1.3.2 Моделювання викидів	24
1.3.4 Порівняння обраних методів моніторингу	26
1.4 Концепція системи	29
1.5 Постановка задачі	31
Висновки до розділу	32
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОНЛАЙН-МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ	34
2.1 Опис функцій, що автоматизуються	34
2.1.1 Актори системи та їх ролі	35
2.1.2 Варіанти використання для еколога	36
2.1.3 Варіанти використання для інших акторів	37
2.2.1 Опис основних сутностей	39
2.2.2 Взаємозв'язки між сутностями	40
2.3.1 Опис основних таблиць	41
2.3.2 Проміжні таблиці для зв'язків	42
2.3.3 Зв'язки між таблицями	42
2.4 Фізична модель бази даних	42
2.4.1 Специфікація таблиць	44
2.4.2 Індексація та оптимізація	45
2.5 Функціональні можливості системи	45
2.5.1 Збір та обробка даних	45
2.5.2 Аналіз та звітність	45
2.5.3 Система оповіщень	46
2.6 Інтеграція з виробничими системами	46
Висновки до розділу	47
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ВИКИДІВ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ	49
3.1. Джерела викидів від обертової печі цементного виробництва	49
3.2. Кількісний і якісний склад викидів обертової печі	51
3.3. Інтерпретація результатів онлайн-моніторингу	52
3.4. Загальний опис змістовного наповнення підсистеми моніторингу	53
3.5. Програма реалізації підсистеми моніторингу	56
3.5.1. Модуль збору даних	56
3.5.2. Модуль розрахунку викидів	56
3.5.3. Модуль візуалізації дашборду	57

3.5.4. Модуль формування звітності	58
3.6. Розробка робочої документації системи	59
3.7. Тестування та апробація системи	60
3.8. Алгоритм виявлення аномалій у даних моніторингу	62
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	
ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОНЛАЙН-МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ	68
4.1. Розрахунок витрат на створення та експлуатацію системи моніторингу	68
4.1.1. Капітальні витрати на обладнання та програмне забезпечення	68
4.1.2. Витрати на монтаж, налаштування та введення в експлуатацію	69
4.1.3. Річні експлуатаційні витрати	70
4.2. Розрахунок економічних вигод від впровадження системи	71
4.2.1. Економія екологічного податку	72
4.3. Розрахунок терміну окупності та показників ефективності	75
4.3.1. Чистий річний економічний ефект	75
4.3.2. Термін окупності	75
4.3.3. Оцінка довгострокової вигоди (Чиста приведена вартість, NPV)	76
4.3.4. Індекс прибутковості (PI)	76
4.3.5. Аналіз стабільності (Аналіз чутливості)	76
4.4. Порівняльний аналіз з альтернативними варіантами	77
Висновки до розділу	78
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ В	
ПРОЦЕСІ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ	80
5.1. Характеристика умов праці інженера-еколога при експлуатації системи моніторингу	80
5.1.1. Робоче місце в адміністративно-побутовому приміщенні (диспетчерська, офіс)	80
5.1.2. Робота на виробничій території	81
5.2. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	81
5.3. Заходи щодо забезпечення безпеки та охорони праці	83
5.4. Пожежна безпека та дії в надзвичайних ситуаціях	84
Висновки до розділу	84
Висновки	86
Список використаних джерел	89

ВСТУП

Сучасне цементне виробництво, будучи важливим елементом економічного розвитку, одночасно є одним із найбільших джерел техногенного навантаження на навколишнє середовище. Особливої уваги заслуговують викиди забруднюючих речовин, таких як пил, оксиди азоту, сірки та вуглецю, які негативно впливають на якість повітря і здоров'я людей. Для зниження цього впливу необхідна ефективна система контролю за викидами, що дозволить не лише зменшити екологічне навантаження, а й відповідати сучасним вимогам сталого розвитку. Одним із перспективних інструментів є впровадження систем онлайн-моніторингу викидів, що дозволяють здійснювати оперативний контроль за станом навколишнього середовища і приймати рішення на основі актуальних даних.

Актуальність обраної тематики полягає в тому, що традиційні методи моніторингу часто є недостатньо оперативними, що не дозволяє вчасно реагувати на перевищення нормативних показників. Впровадження сучасних інформаційних технологій, зокрема систем онлайн-моніторингу з використанням баз даних, дозволить не лише підвищити точність та швидкість отримання даних, але й забезпечити їх інтеграцію в інформаційний простір підприємства. Це особливо важливо в умовах посилення екологічного контролю на національному та міжнародному рівнях.

Об'єкт дослідження – процеси моніторингу забруднюючих речовин у викидах цементного виробництва.

Предмет дослідження – інформаційні технології та методи для впровадження системи онлайн-моніторингу викидів із використанням баз даних.

Мета роботи – розробка концептуальної моделі системи онлайн-моніторингу викидів цементного заводу та її інформаційної складової для забезпечення екологічного контролю і зниження техногенного навантаження.

Завдання роботи:

1. Визначити основні показники, які підлягають моніторингу на цементному виробництві.
2. Розробити концептуальну модель системи онлайн-моніторингу викидів.
3. Спроекувати технічну й інформаційну інфраструктуру системи.
4. Створити структуру бази даних для зберігання, аналізу та візуалізації даних.
5. Запропонувати алгоритми функціонування системи з урахуванням реальних умов виробництва.

Методи дослідження включають аналіз літературних джерел з питань екологічного моніторингу, математичне моделювання процесів викидів, проектування баз даних, а також сучасні методи інформаційних технологій для інтеграції даних у єдину інформаційну систему.

Інформаційна база дослідження ґрунтується на даних про технологічні процеси цементного виробництва, нормативних актах у сфері екологічного контролю, результатах наукових досліджень і сучасних розробках в галузі екологічного моніторингу.

Наукова новизна роботи полягає в запропонованому підході до інтеграції систем онлайн-моніторингу в технологічні процеси цементного виробництва з акцентом на використання баз даних для зберігання, аналізу й прогнозування параметрів викидів.

Теоретична значущість роботи полягає в обґрунтуванні концепції системи онлайн-моніторингу, що може бути використана як основа для подальших досліджень у цій галузі.

Практична значущість полягає в можливості використання запропонованих рішень для впровадження систем моніторингу на цементних підприємствах, що сприятиме покращенню екологічного стану та підвищенню ефективності екологічного управління.

Таким чином, дана робота спрямована на вирішення актуальних екологічних проблем у цементному виробництві шляхом розробки сучасних інформаційних систем, що є важливим кроком до сталого розвитку галузі.

РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ МОНІТОРИНГОВИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НА ЦЕМЕНТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ТА АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз предметної області на прикладі цементного заводу

Цемент є одним із основних будівельних матеріалів, який має надзвичайно важливе значення для розвитку будівництва та інфраструктури. Він служить сполучною речовиною, яка надає міцність та стійкість бетону, розчину та інших будівельних сумішей. Цемент, як універсальний матеріал, використовується в будівництві різних типів споруд, включно з житловими будинками, комерційними приміщеннями, промисловими об'єктами, мостами, дорогами, а також оборонними спорудами.

Основні властивості цементу:

1. **Міцність:** Цемент забезпечує високу міцність конструкцій, особливо коли використовується в складі бетону. Це дозволяє спорудам витримувати великі навантаження та довговічно функціонувати навіть у суворих кліматичних умовах.
2. **Стійкість до зовнішніх впливів:** Завдяки цементу будівельні конструкції стають стійкими до атмосферних явищ, таких як дощ, сніг, вітер, а також до фізичних навантажень.
3. **Універсальність:** Цемент є основним матеріалом для багатьох будівельних процесів, оскільки він може використовуватися для виготовлення різноманітних будівельних сумішей – від простих розчинів до складних бетонних конструкцій.
4. **Довговічність:** Споруди, побудовані з використанням цементу, здатні служити десятиліттями, що робить його ефективним матеріалом з економічної точки зору.

У мирний час цемент широко застосовувався в Україні для будівництва житлових будинків, доріг, мостів та інших інфраструктурних об'єктів. Однак після початку повномасштабної війни в Україні попит на цемент різко зріс. Причини цього збільшення можна пояснити декількома важливими факторами:

1. Відновлення зруйнованих об'єктів: Значна частина житлової, транспортної та промислової інфраструктури України постраждала або була повністю зруйнована внаслідок бойових дій. Після визволення деяких територій постала гостра потреба в їхньому відновленні. Будинки, дороги, мости, лікарні та школи, зруйновані бомбардуваннями, вимагають негайної реконструкції для відновлення нормального функціонування суспільства. Для цього цемент є незамінним матеріалом, оскільки його використовують при зведенні нових будівель та ремонті пошкоджених об'єктів.
2. Військові та оборонні споруди: В умовах війни важливим є також будівництво оборонних споруд, таких як бункери, укриття та фортифікаційні споруди. Цемент відіграє вирішальну роль у зміцненні таких конструкцій, адже він швидко твердіє та забезпечує високу стійкість до зовнішніх впливів, що є критичним під час військових операцій.
3. Будівництво тимчасових житлових споруд: У багатьох регіонах, які постраждали від бойових дій, необхідно забезпечити населення тимчасовим житлом. Для цього споруджуються тимчасові модульні будинки, у будівництві яких цемент використовується для фундаменту, підлоги, перегородок та інших елементів.
4. Реконструкція транспортної інфраструктури: Пошкоджені або зруйновані залізничні колії, дороги та мости є ключовими елементами для забезпечення логістики в умовах війни. Цемент використовують для відновлення цих об'єктів, адже він дозволяє швидко відбудовувати мости та дорожні покриття, які забезпечують транспортування вантажів, гуманітарної допомоги, військової техніки та інших необхідних ресурсів.

Цемент має не лише важливе значення для відновлення зруйнованих об'єктів, але й є стратегічним ресурсом для підтримки економічної стабільності України. Під час війни велика частина промислових підприємств та виробничих потужностей була зруйнована або зупинена, тому відновлення цементних

заводів та інших будівельних підприємств стало ключовим завданням для уряду та бізнесу.

Цементні заводи забезпечують внутрішні потреби країни в будівельних матеріалах, знижуючи залежність від імпорту та підвищуючи самодостатність економіки. Відновлення внутрішньої будівельної галузі та інфраструктури дає можливість залучати іноземні інвестиції, створювати нові робочі місця та забезпечувати економічне зростання в умовах кризи.

Сучасні будівельні технології активно використовують цемент у поєднанні з іншими матеріалами для підвищення енергоефективності будівель, збільшення їх сейсмостійкості та зниження вартості будівництва. Нові інноваційні цементні суміші дозволяють досягати кращих результатів у будівництві, забезпечуючи надійність і довговічність споруд при зниженні негативного впливу на навколишнє середовище.

Станом на сьогодні, виробнича потужність типового заводу складає приблизно 1,5 мільйона тонн цементу на рік. Це дозволяє підприємству забезпечувати значну частину попиту на цемент не тільки на півдні України, але й по всій країні. Крім того, такий завод активно постачає свою продукцію для різних інфраструктурних проектів, включно з будівництвом і відновленням доріг, мостів, житлових і промислових об'єктів.

Наприклад, цементний завод спеціалізується на виробництві широкого спектру цементних матеріалів, які відповідають найвищим європейським стандартам якості. Основні види цементу, що виготовляються на підприємстві, включають:

1. Портландцемент (CEM I) – один із найпоширеніших видів цементу, який застосовується в будівництві різноманітних об'єктів. Портландцемент виробляється з вапняку та глини й використовується для виготовлення бетонних та залізобетонних конструкцій.
2. Шлакопортландцемент (CEM II) – цемент, що містить певний відсоток доменних шлаків, що робить його стійкішим до агресивних середовищ і дозволяє знижувати витрати на виробництво за рахунок вторинної

сировини. Він використовується в будівництві великих інфраструктурних проектів, таких як дороги, мости та гідротехнічні споруди.

3. Цемент зі спеціальними добавками – це різні типи цементу з додаванням мінеральних або хімічних добавок для надання йому особливих властивостей, таких як підвищена стійкість до сульфатів або зменшене виділення тепла під час затвердіння. Такі цементи використовуються у складних умовах, зокрема при будівництві підземних споруд або у водних середовищах.

Таким чином, цементний завод грає ключову роль у забезпеченні будівельної галузі країни високоякісними матеріалами. Завдяки своїй потужності та сучасним технологіям підприємство робить значний внесок у відновлення зруйнованої війною інфраструктури та розвиток економіки України.

Цементне виробництво, попри свою важливість для розвитку інфраструктури та економіки, є одним із найбільш енергоємних процесів, що чинить значний вплив на навколишнє середовище. Окрім того, воно супроводжується викидами шкідливих речовин, які можуть негативно впливати на екологію. Важливим аспектом є те, що з початком війни заводи були змушені перейти з природного газу на вугілля як основне паливо для виробничих процесів, що призвело до певного збільшення екологічного навантаження.

Цементна промисловість супроводжується викидами кількох видів забруднювальних речовин:

1. Діоксид вуглецю (CO_2) – це один із найголовніших продуктів, що виділяються під час виробництва цементу. Велика кількість CO_2 виділяється при нагріванні вапняку для отримання клінкеру, основного компонента цементу, а також при спалюванні палива для обігріву печей. Виробництво цементу є одним із найбільших джерел антропогенних викидів діоксиду вуглецю в атмосферу. Виробництво цементу є одним із найбільших джерел антропогенних викидів діоксиду вуглецю; у 2018 році глобальні процесні викиди становили приблизно $1,50 \pm 0,12$ гігатонни CO_2 . [1].

2. Оксиди азоту (NO_x) – це група газів, які утворюються при високих температурах у печах. Оксиди азоту є причиною утворення фотохімічного смогу, а також впливають на кислотність опадів, що шкодить рослинності і водоймам.
3. Діоксид сірки (SO_2) – цей газ утворюється при спалюванні палива, що містить сірку, зокрема вугілля. Діоксид сірки спричиняє кислотні дощі, які шкодять ґрунтам, водоймам і флорі. Використання вугілля як основного палива підвищує ризик збільшення викидів цього газу.
4. Пил – цементне виробництво пов'язане з утворенням значної кількості пилу, який може містити дрібнодисперсні частинки оксиду кальцію, силікату та інших мінералів. Пил є небезпечним для здоров'я людей, особливо для робітників, і може спричиняти респіраторні захворювання.
5. Летючі органічні сполуки (ЛОС) – ці речовини також можуть виділятися під час процесу виробництва, хоча їх кількість є значно меншою порівняно з іншими забруднювачами. ЛОС можуть сприяти утворенню озону на рівні ґрунту, що є шкідливим для здоров'я людини.

Оцінка впливу показує, що виробництво цементу характеризується високим енергоспоживанням і значними викидами забруднюючих речовин, зокрема CO_2 , NO_x та пилу, залежно від технології виробництва та типу палива [2].

До початку війни багато промислових підприємств в Україні використовувало природний газ як основне джерело енергії для нагрівання печей у процесі виробництва цементу. Природний газ є менш забруднювальним паливом порівняно з вугіллям, оскільки під час його спалювання утворюється менша кількість діоксиду сірки та пилу.

Виробництво цементу є одним із найенергетично-інтенсивних промислових процесів, що супроводжується значними викидами парникових газів, і тому вимагає впровадження технологій зі зниження вуглецевого сліду [3].

Проте з початком війни та через перебої в постачанні газу, а також через економічні та енергетичні труднощі, завод був змушений перейти на

використання вугілля як основного палива. Цей перехід мав низку наслідків для екологічної ситуації:

1. Збільшення викидів SO_2 – спалювання вугілля супроводжується виділенням діоксиду сірки в атмосферу, що підвищує ризик утворення кислотних дощів.
2. Підвищення рівня викидів пилу – вугілля містить більше твердих частинок, які потрапляють в атмосферу у вигляді пилу. Це впливає на якість повітря і може викликати проблеми зі здоров'ям у населення, що проживає поблизу заводу.
3. Зростання викидів CO_2 – вугілля є більш вуглецево-інтенсивним паливом порівняно з природним газом, тому його спалювання призводить до збільшення викидів діоксиду вуглецю.

Попри те, що цементне виробництво має значний вплив на екологію, цементний завод вживає заходів для мінімізації цього впливу. Основні екологічні ініціативи підприємств включають:

1. Системи очищення газів і фільтрація пилу – на заводі встановлено сучасні фільтрувальні установки, які значно знижують кількість пилу, що потрапляє в атмосферу. Це допомагає зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище та забезпечити безпеку працівників.
2. Зниження викидів NO_x – завод використовує спеціальні технології для контролю та зниження викидів оксидів азоту під час високотемпературних процесів у печах.
3. Удосконалення енергоефективності – підприємство постійно працює над покращенням енергоефективності виробництва, що дозволяє знизити витрати палива та викиди шкідливих речовин. Зокрема, використання сухого способу виробництва цементу, який є більш економічним з точки зору енергоспоживання, допомагає зменшити загальну кількість викидів.
4. Рекуперація тепла – використання вторинного тепла від виробничих процесів для підігріву інших ділянок виробництва дозволяє знижувати споживання палива і, відповідно, скорочувати викиди.

Виклики та перспективи

Перехід на вугілля є вимушеним кроком у контексті воєнного часу, але після стабілізації ситуації завод планує повернутися до використання більш екологічно чистих джерел енергії, зокрема природного газу та альтернативних видів палива.

Таким чином, цементне виробництво на такому заводі має екологічні наслідки, пов'язані з викидами CO₂, NO_x, SO₂ та пилу. Перехід на вугілля під час війни призвів до підвищення рівня забруднень, але завод продовжує впроваджувати заходи для мінімізації впливу на навколишнє середовище та працює над підвищенням екологічної ефективності своїх процесів.

1.1.2 Опис організаційної структури філії цементного заводу

Організаційна структура філії типового цементного заводу представлена як багаторівнева система управління з чітким функціональним поділом підрозділів. Ця структура (рис. 1) забезпечує ефективну взаємодію між керівництвом, виробничими, адміністративними та технічними службами підприємства, що є ключовою умовою для досягнення стратегічних цілей організації.

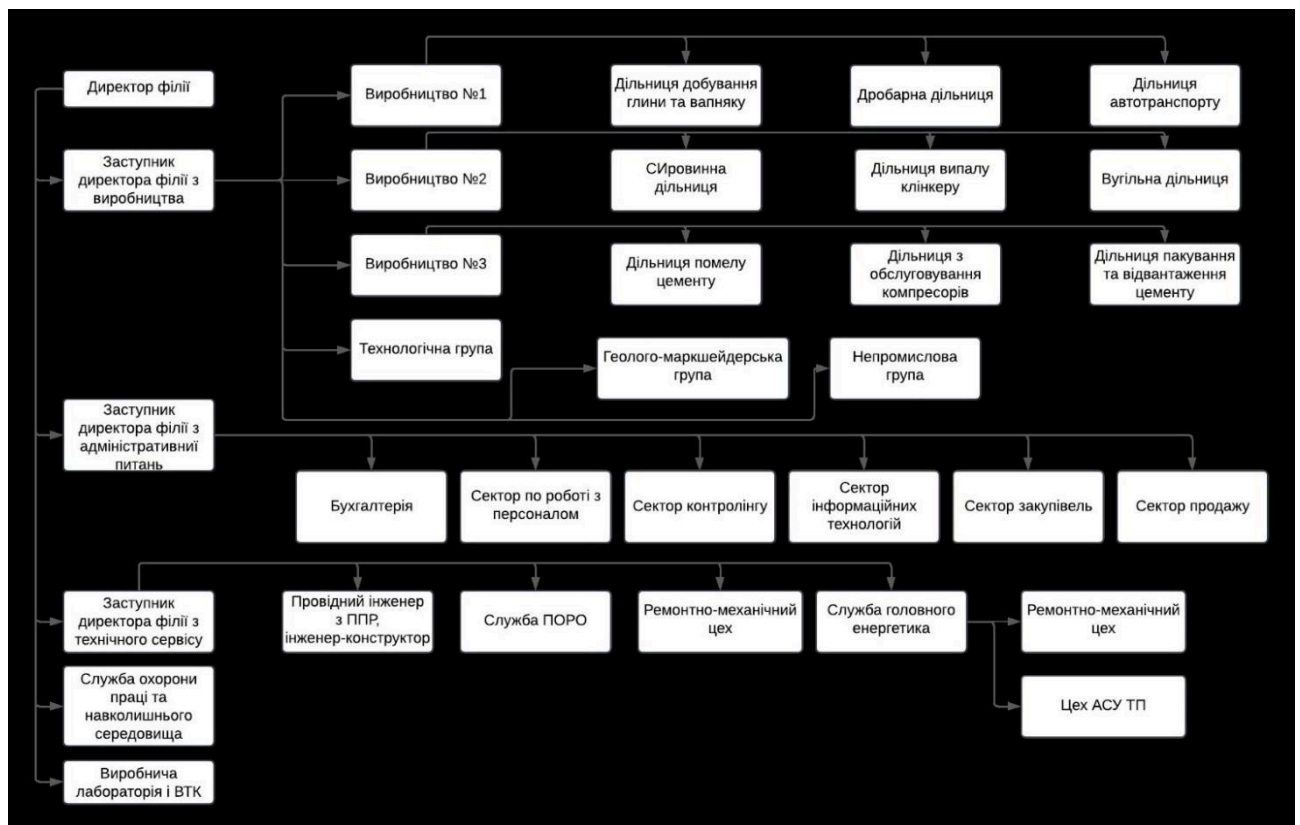


Рис. 1. Організаційна структура цементного заводу

На вершині структури знаходиться Директор філії, який здійснює загальне керівництво підприємством, приймає стратегічні рішення та координує діяльність усіх структурних підрозділів. Директор має трьох заступників:

1. Заступник директора з виробництва відповідає за керування виробничими процесами, включаючи видобуток сировини, виробництво клінкеру, помел цементу та пакування готової продукції.

2. Заступник директора з адміністративних питань керує функціями підтримки, такими як робота з персоналом, бухгалтерія, контролінг та закупівлі.

3. Заступник директора з технічного сервісу забезпечує технічне обслуговування, енергопостачання, а також ремонт та модернізацію обладнання.

Виробничі потужності філії представлені трьома основними виробництвами:

- Виробництво №1 займається видобутком глини та вапняку, їх подрібненням, а також організацією транспортування.
- Виробництво №2 відповідає за сировинну підготовку, випал клінкеру та обслуговування вугільної дільниці.
- Виробництво №3 фокусується на помелі цементу, обслуговуванні компресорів і насосів, а також пакуванні та відвантаженні готової продукції.

Крім того, у складі виробничого сектору діє технологічна група, яка займається розробкою та впровадженням технологічних рішень для підвищення ефективності виробництва.

Адміністративна група об'єднує підрозділи, які забезпечують підтримку бізнес-процесів підприємства:

- Бухгалтерія;
- Сектор роботи з персоналом;
- Сектор контролінгу;
- Сектор інформаційних технологій;
- Сектор закупівель;

- Сектор продажу.

Координація цих підрозділів спрямована на оптимізацію внутрішніх процесів та підвищення ефективності управління ресурсами.

Служба технічного сервісу виконує ключову роль у забезпеченні безперебійної роботи обладнання та енергосистем. Її структура включає:

- Ремонтно-механічний цех;
- Службу головного енергетика, що складається з ремонтно-електричного цеху та цеху АСУ ТП;
- Службу ПОРО (підтримка обладнання, ремонт та обслуговування).

На підприємстві функціонують спеціалізовані служби для забезпечення дотримання екологічних норм та контролю якості продукції:

- Служба охорони праці та навколишнього середовища здійснює моніторинг екологічних аспектів діяльності підприємства та забезпечує безпечні умови для працівників.
- Виробнича лабораторія та ВТК забезпечують контроль якості сировини і готової продукції.

Служба охорони праці та навколишнього середовища (ОНП та ОНС) на цементному заводі – це стратегічний підрозділ, відповідальний за забезпечення безпечних та екологічно чистих умов праці та виробництва. Її діяльність спрямована на запобігання нещасним випадкам, професійним захворюванням, мінімізацію негативного впливу виробництва на довкілля та дотримання всіх вимог чинного законодавства.

Основні завдання служби:

- Оцінка ризиків: Проведення регулярних оцінок ризиків на всіх виробничих ділянках, виявлення потенційних небезпек та розробка заходів для їх усунення.
- Розробка та впровадження систем управління: Створення та впровадження ефективних систем управління охороною праці та охороною навколишнього середовища, таких як системи управління

охороною здоров'я та безпекою (OHSAS 18001) та системи екологічного менеджменту (ISO 14001).

- Контроль за дотриманням законодавства: Моніторинг змін у законодавстві та нормативних актах, контроль за їх виконанням на підприємстві, розробка внутрішніх документів (інструкцій, положень) з охорони праці та навколишнього середовища.
- Навчання персоналу: Проведення регулярних навчань та інструктажів з питань охорони праці та навколишнього середовища для всіх категорій працівників.
- Розслідування інцидентів: Проведення розслідувань нещасних випадків, професійних захворювань та інших інцидентів, розробка пропозицій щодо запобігання їх повторенню.
- Взаємодія з державними органами: Взаємодія з державними органами контролю (Держпраці, Держекоінспекцією) з питань виконання вимог законодавства.
- Екологічний моніторинг: Проведення моніторингу викидів, стічних вод, відходів виробництва, контролю за станом довкілля в зоні впливу підприємства.
- Розробка та впровадження екологічних проектів: Розробка та впровадження проектів з енергозбереження, зниження викидів, утилізації відходів, використання екологічно чистих технологій.

Загалом, служба ОНП та ОНС є важливим елементом системи управління підприємством, що забезпечує безпеку праці, захищає довкілля та сприяє досягненню сталого розвитку.

Цементна промисловість є одним з найбільших споживачів енергії та джерелом значних викидів забруднюючих речовин. Тому роль інженера з охорони навколишнього середовища на такому підприємстві є надзвичайно важливою. Цей фахівець відповідає за мінімізацію негативного впливу виробництва на довкілля, розробку та впровадження ефективних екологічних технологій.

Наша мета – полегшити, оптимізувати роботу інженера з ОНС, зробити заміри концентрацій забруднюючих речовин, що викидаються у повітря простішими і точнішими. Інженер з охорони навколишнього середовища спеціалізується на питаннях взаємодії підприємства з довкіллям, проводить моніторинг, розробляє заходи щодо зниження негативного впливу виробництва, взаємодіє з екологічними службами.

1.2 Огляд методів моніторингу забруднень, що застосовуються на виробництві

Вимірювання концентрацій шкідливих речовин у викидах з цементної оборотної печі є одним з найважливіших етапів моніторингу впливу виробництва на довкілля. Цей процес дозволяє оцінити ефективність роботи очисних споруд, переконатися у відповідності виробництва до екологічних норм та виявити потенційні проблеми.

Для оборотних цементних печей основними контрольованими забруднювальними речовинами є пил, оксиди азоту, діоксид сірки та оксиди карбону, концентрації яких визначаються шляхом періодичних або безперервних вимірювань у димових газах [4].

Перелік речовин, які визначаються в викидах цементних печей, залежить від технологічного процесу, використовуваної сировини та вимог чинного законодавства. На виробництві вимірюють концентрації пилу, діоксиду сірки, оксидів азоту, оксидів карбону та інших шкідливих речовин.

Такі вимірювання проводять для:

- Оцінки ефективності очисних споруд: Порівнюючи результати вимірювань з нормативними значеннями, можна оцінити, наскільки ефективно працюють пилоочисні установки та інші очисні споруди. Вимірювання концентрації пилу після газоочисного обладнання є основним методом оцінки ефективності електрофільтрів і рукавних фільтрів на цементних підприємствах [5].
- Контролю дотримання екологічних норм: Регулярні вимірювання дозволяють переконатися, що підприємство дотримується вимог екологічного законодавства.

- Виявлення проблемних ділянок: Якщо концентрація будь-якої шкідливої речовини перевищує норму, це свідчить про проблеми в технологічному процесі або несправності обладнання.
- Оптимізації виробництва: Дані про концентрації викидів дозволяють оптимізувати технологічні процеси з метою зниження викидів шкідливих речовин.
- Збору даних для звітності: Результати вимірювань використовуються для складання екологічної звітності підприємства.

Регулярний контроль концентрацій CO, NO_x та SO₂ у викидах цементних печей дозволяє своєчасно виявляти відхилення в роботі технологічного обладнання та забезпечувати дотримання екологічних нормативів [6].

Регулярний моніторинг викидів дозволяє своєчасно виявляти зміни в їх складі та вживати необхідних заходів. Це дозволяє уникнути екологічних аварій, зберегти довкілля та здоров'я людей.

Вимірювання концентрацій викидів з цементної обертової печі є важливим інструментом для забезпечення екологічної безпеки виробництва. Цей процес дозволяє оцінити вплив підприємства на довкілля, контролювати дотримання екологічних норм та вчасно виявляти проблеми. Регулярний моніторинг викидів є необхідною умовою для забезпечення сталого розвитку виробництва.

Інженер з ОНС зобов'язаний збирати інформацію з метою виконання обліку та звітності за результатами природоохоронної діяльності підприємства, проводити відбір проб промислових викидів підприємства, узагальнювати матеріали з питань лабораторного контролю та прогнозування для підготовки інформації з питань охорони довкілля.

Відбір проб повітря після фільтру на цементному заводі має на меті оцінити концентрацію шкідливих речовин (гази, пил), температуру та швидкість повітря викидів.

Процес відбору проб повітря після фільтра цементної печі:

1. Перед початком потрібно переконатися, що обладнання справне та правильно відкаліброване. Місце відбору проб вибирається відповідно до державних стандартів та за вимогою до дистанції від джерела викиду.
2. За допомогою Testo 340 визначається склад газів, температури та швидкості. У газах перевіряється наявність та концентрація CO, NOx, SO₂.
3. За допомогою трубки Піто визначається статичний і динамічний тиск. Це дозволяє оцінити швидкість потоку повітря та зробити точні вимірювання. Прилад ММЦ 2000 фіксує динамічний тиск, який створюється безпосередньо потоком повітря, що надходить в трубку. Трубка Піто має бічні отвори, через які вимірюється статичний тиск повітря (незалежно від його руху). Отримавши значення тиску, розраховується швидкість потоку повітря.
4. Для відбору проб використовуйте касети-фільтри (металеві циліндри, куди закладається скловата або інший фільтруючий матеріал). Касети вставляються в спеціальну відбірну трубку, яка під'єднується до електроаспіратора. Електроаспіратор забезпечує постійний потік повітря через фільтрувальний матеріал. • Проба збирається тричі, кожен раз протягом 20 хвилин, щоб отримати репрезентативний результат. Електроаспіратор регулюється на необхідну швидкість потоку, яка відповідає нормативним вимогам для аналізу пилу на цементних виробництвах. Записується час початку і кінця кожного етапу відбору проб, умови навколишнього середовища (температура та атмосферний тиск), показники швидкості потоку та інші параметри, щоб гарантувати точність результатів. Після завершення відбору касети-фільтри герметично закриваються і доставляються в лабораторію, де вимірюється кількість зібраного пилу на фільтрувальному матеріалі. Для цього проби залишають у сушильній шафі при температурі 80°C на 1 годину. Потім за різницею і з застосуванням формул розраховується концентрація пилу у відфільтрованому повітрі.

Для відбору проб пилу в газах після фільтру інженер з ОНС використовує наступні основні стандарти (ГОСТ та ДСТУ):

1. ГОСТ 17.2.3.01-86 - Охорона природи. Атмосфера. Правила контролю якості повітря.
2. ДСТУ ISO 9096:2013 - Повітря якість. Визначення концентрації пилу в стаціонарних джерелах викидів.
3. ДСТУ 33029-2014 - Атмосферне повітря на виробничих територіях.
4. ДСТУ ISO 4225:2003 - Якість повітря. Терміни та визначення.
5. ДСТУ EN 13284-1:2014 - Стаціонарні джерела. Визначення низьких концентрацій пилу.

Ці стандарти регламентують процеси відбору проб, аналізу та вимог до обладнання для оцінки рівнів пилу та інших забруднювачів у промислових газах.

1.3 Альтернативні підходи до вимірювання викидів на виробництві

Один із поширених методів – онлайн-моніторинг. Це передбачає використання спеціальних аналізаторів, які безперервно відбирають проби газів і визначають концентрацію забруднюючих речовин. Такий підхід дозволяє отримувати оперативну інформацію про стан викидів та швидко реагувати на зміни.

Іншим цікавим методом є моделювання викидів. За допомогою математичних моделей можна прогнозувати, як зміняться викиди при різних умовах роботи заводу. Це дозволяє оцінити ефективність різних заходів щодо зниження викидів та планувати подальші дії.

Також варто згадати про супутникові знімки. За допомогою сучасних супутників можна спостерігати за великими територіями та виявляти джерела забруднення. Цей метод дозволяє отримати загальну картину забруднення атмосфери в регіоні.

Крім того, для оцінки впливу забруднення на довкілля можна використовувати біоіндикацію. Цей метод полягає у вивченні реакції живих організмів (рослин, тварин) на забруднення. За змінами в їхньому стані можна судити про рівень забруднення довкілля.

Вибір конкретного методу вимірювання залежить від багатьох факторів, таких як:

- Мета вимірювань: контроль дотримання норм, оптимізація виробництва, наукові дослідження тощо.
- Вид забруднюючих речовин: пил, газы, важкі метали тощо.
- Вимоги до точності та оперативності вимірювань:
- Вартість обладнання та експлуатації:
- Наявність кваліфікованого персоналу.

Будь-який метод вимірювання вимагає регулярної калібрування та метрологічної атестації обладнання для забезпечення достовірності результатів.

Інтенсифікація технологічних процесів на цементних заводах призводить до збільшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, що потребує постійного контролю стану атмосферного повітря і моніторингу забруднення [7].

Зробивши аналіз постає актуальна задача створення системи онлайн моніторингу та систему моделювання викидів, зважаючи на те, що супутникові знімки та біоіндикація не задовольняють потреби виробництва через низьку точність результатів та неможливості подавати звіти з точними концентраціями забруднень. Моніторинг впливу виробництва портландцементу на атмосферу передбачає систематичне спостереження за концентраціями шкідливих компонентів викидів для оцінювання екологічних ризиків та дотримання нормативів [8].

1.3.1 Онлайн-моніторинг викидів

Онлайн-моніторинг – це сучасна система безперервного контролю за складом викидів промислових підприємств. Виробництво цементу є енергоємним процесом, що супроводжується широким спектром викидів, включаючи пил, CO₂, NO_x і SO₂, які потребують ретельного вимірювання і контролю [9]. Цей метод передбачає використання спеціальних датчиків, які встановлюються безпосередньо на джерелах викидів (наприклад, на трубі печі). Датчики в режимі реального часу вимірюють концентрацію різних забруднюючих речовин у викидах і передають дані на централізований сервер або робоче місце оператора.

Система онлайн-моніторингу працює за наступним алгоритмом:

1. Датчики постійно відбирають невеликі порції газу з потоку викидів.
2. Взяті проби аналізуються на наявність і концентрацію різних забруднюючих речовин (пил, діоксид сірки, оксиди азоту, важкі метали тощо).
3. Отримані дані передаються на централізований сервер за допомогою мережевого з'єднання.
4. Програмне забезпечення обробляє отримані дані, будує графіки, таблиці та виконує необхідні розрахунки.
5. Дані про викиди відображаються на екрані у зручному для сприйняття вигляді.
6. Система генерує сигнали тривоги у випадку перевищення нормативних значень концентрації забруднюючих речовин.

Переваги онлайн-моніторингу:

- Дані про концентрацію забруднюючих речовин отримують в режимі реального часу. Це дозволяє своєчасно виявляти перевищення нормативів та вживати необхідних заходів.
- Сучасні датчики забезпечують високу точність вимірювань.
- Моніторинг здійснюється цілодобово, що дозволяє виявляти як короткочасні, так і довгострокові зміни в складі викидів.
- Більшість систем онлайн-моніторингу автоматизовані, що мінімізує людський фактор і знижує ймовірність помилок.
- Дані про викиди можуть бути візуалізовані у вигляді графіків, таблиць або інтерактивних карт, що полегшує аналіз інформації.
- Систему онлайн-моніторингу можна інтегрувати в загальну систему управління виробництвом, що дозволяє оптимізувати технологічні процеси та знизити витрати.

Вибір датчиків залежить від конкретних умов виробництва та переліку забруднюючих речовин, які необхідно контролювати. Зазвичай використовують датчики для вимірювання концентрації пилу, діоксиду сірки, температури газів, швидкості газу та вологості.

Недоліки онлайн-моніторингу:

- Встановлення та обслуговування системи онлайн-моніторингу є досить дорогим.
- Для ефективної роботи системи необхідна кваліфікація обслуговуючого персоналу.
- Незважаючи на високу точність, датчики можуть давати помилкові результати через забруднення, пошкодження або інші фактори.
- Датчики потребують регулярної калібрування для забезпечення точності вимірювань.

Онлайн-моніторинг є ефективним інструментом для контролю за викидами на цементному виробництві. Незважаючи на високу вартість, цей метод дозволяє отримати точну і оперативну інформацію про стан викидів, що є необхідним для забезпечення екологічної безпеки виробництва.

1.3.2 Моделювання викидів

Моделювання викидів – це потужний інструмент, який дозволяє нам зазирнути в майбутнє і передбачити, скільки забруднюючих речовин буде викинуто в атмосферу при різних сценаріях роботи підприємства. Це не просто сукупність чисел, а скоріше інтерактивна модель, яка дозволяє нам експериментувати з різними параметрами виробництва і бачити, як це вплине на навколишнє середовище.

Моделювання викидів – це складний процес, який включає в себе кілька етапів:

1. Збір даних. Спочатку збирається велика кількість інформації про підприємство: його технологічні процеси, використовуване паливо, кількість сировини, ефективність очисних споруд і інше.
2. Створення моделі. На основі зібраних даних створюється математична модель, яка описує всі процеси, що відбуваються на підприємстві, і пов'язані з утворенням викидів.
3. Прогнозування. За допомогою цієї моделі можна прогнозувати, як зміняться викиди при різних сценаріях: наприклад, при збільшенні

виробництва, зміні технологічного процесу або встановленні нового обладнання.

Це використовується для планування (моделювання дозволяє планувати заходи щодо зниження викидів заздалегідь, а не реагувати на вже виниклі проблеми), оцінки ефективності (за допомогою моделей можна оцінити, наскільки ефективними будуть ті чи інші заходи щодо зниження викидів), оптимізації виробництва (моделювання дозволяє знайти оптимальні режими роботи обладнання, які дозволять мінімізувати викиди при збереженні високої продуктивності), розробки нових технологій (моделювання використовується для розробки нових технологій, які дозволять знизити викиди).

Переваги моделювання викидів на цементному виробництві:

- Моделювання дозволяє знаходити найефективніші режими роботи обладнання, що мінімізує витрати на паливо та сировину, а також знижує викиди.
- Допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо інвестицій у нове обладнання або технології очищення газів, оцінюючи їх ефективність.
- Можна моделювати різні сценарії розвитку виробництва і оцінювати їх вплив на довкілля.
- Дозволяє прогнозувати майбутні викиди і розробляти заходи для їх зниження.
- Детальні розрахунки викидів, отримані в результаті моделювання, можуть бути використані для отримання дозволів на викиди.
- Підприємства, які використовують моделювання, можуть позиціонувати себе як більш екологічні і відповідальні.
- Моделювання є потужним інструментом для проведення наукових досліджень в галузі охорони навколишнього середовища.

Недоліки моделювання викидів:

- Створення і використання моделей вимагає високої кваліфікації фахівців.
- Розробка і впровадження моделі може бути досить дорогою.

- Результати моделювання завжди мають певну похибку, оскільки реальні процеси є більш складними, ніж математичні моделі.
- Створення і калібрування моделі вимагає значних часових витрат.
- Для створення адекватної моделі необхідна велика кількість точних даних про виробництво.
- Існуючі моделі можуть не враховувати всі аспекти реального виробництва.

Моделювання викидів — це сучасний та багатфункціональний інструмент для оцінки та управління впливом промислового виробництва на навколишнє середовище. Воно дає можливість не лише аналізувати поточну ситуацію, а й прогнозувати майбутні викиди за різних сценаріїв розвитку підприємства. Завдяки інтеграції математичних моделей, цей підхід сприяє ефективнішому плануванню, оптимізації технологічних процесів і прийняттю інвестиційних рішень.

Основними перевагами моделювання є можливість створення сценаріїв розвитку виробництва, прогнозування майбутніх викидів, оптимізація використання ресурсів та підвищення екологічної відповідальності підприємства. Використання моделювання допомагає не лише мінімізувати негативний вплив на довкілля, а й підвищити конкурентоспроможність виробництва завдяки впровадженню інноваційних технологій. Моделювання викидів дозволяє прогнозувати розповсюдження забруднюючих речовин за різних сценаріїв роботи підприємства, однак точність результатів значною мірою залежить від якості вхідних даних та коректності калібрування моделей [10].

Водночас метод має і певні недоліки, зокрема складність реалізації, значну вартість, залежність від точності вихідних даних та обмеження моделей у врахуванні реальних виробничих умов. Незважаючи на ці виклики, моделювання залишається перспективним інструментом для сталого розвитку промислових підприємств, зокрема цементної галузі. Воно відкриває нові горизонти для інтеграції наукових досліджень та впровадження екологічно орієнтованих рішень.

1.3.4 Порівняння обраних методів моніторингу

Обидва методи, онлайн-моніторинг та моделювання викидів, мають свої переваги і недоліки. Оптимальне рішення для конкретного підприємства залежить від його розміру, специфіки виробництва, поставлених цілей та наявних ресурсів. Онлайн-моніторинг забезпечує оперативну інформацію про поточний стан викидів, а моделювання дозволяє прогнозувати майбутні зміни і розробляти стратегії для зниження викидів(таб. 1.1).

Таблиця 1.1

Порівняння наявного методу моніторингу та запропонованих

Характеристика	Інструментальний метод (використовується зараз)	Онлайн-моніторинг	Моделювання викидів
Мета	Вимірювання фактичних викидів	Безперервне вимірювання фактичних викидів в реальному часі	Прогнозування майбутніх викидів на основі математичних моделей
Дані	Надає точні дані про поточний стан викидів	Надає точні дані про поточний стан викидів	Використовує історичні дані та моделює різні сценарії
Час	Раз на місяць, потребує великих затрат часу інженера з ОНС	Забезпечує оперативну інформацію	Дозволяє прогнозувати на майбутнє
Вартість	Високі інвестиції в обладнання	Високі початкові інвестиції в обладнання, але низькі поточні	Висока вартість розробки та калібрування

		витрати на експлуатацію	моделі, але низькі поточні витрати на використання
Складність	Вимагає високої кваліфікації фахівців для створення та використання моделей	Відносно проста система, що не вимагає високої кваліфікації для обслуговування	Вимагає високої кваліфікації фахівців для створення та використання моделей
Гнучкість	Зовсім не гнучка	Обмежена зміною параметрів датчиків	Дозволяє моделювати різні сценарії і проводити аналіз чутливості
Точність	Точність залежить від інструментів, висока вірогідність помилки працівника	Забезпечує високу точність вимірювань в реальному часі	Точність результатів залежить від якості даних і складності моделі
Застосування	Контроль дотримання екологічних норм	Контроль дотримання екологічних норм, виявлення аварійних ситуацій	Оптимізація виробництва, планування інвестицій, розробка нових технологій

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що онлайн-моніторинг є більш доцільним рішенням для більшості цементних підприємств, особливо на початкових етапах впровадження систем екологічного контролю.

Безперервний моніторинг викидів є ключовим інструментом для контролю екологічних показників цементного виробництва, оскільки дозволяє оперативно виявляти відхилення в роботі технологічного обладнання та оцінювати ефективність газоочисних систем [11].

Основні причини такого вибору:

- Оперативність, онлайн-моніторинг забезпечує миттєву інформацію про стан викидів, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які відхилення від норми.
- Точність, через те що сучасні датчики забезпечують високу точність вимірювань, що дозволяє отримати достовірні дані про склад і об'єм викидів.
- Простота використання (тому що системи онлайн-моніторингу відносно прості в установці та обслуговуванні).
- Доступність, бо вартість обладнання для онлайн-моніторингу постійно знижується, що робить його більш доступним для підприємств різного розміру.
- Візуалізація даних (можливість отримання даних у зручному для сприйняття вигляді (графіки, таблиці) полегшує аналіз і прийняття рішень).

Звичайно, моделювання викидів також є важливим інструментом, особливо для довгострокового планування і розробки нових технологій. Однак, для більшості підприємств онлайн-моніторинг є більш пріоритетним завданням, оскільки він дозволяє забезпечити постійний контроль за викидами і дотримуватися екологічних норм. Для цементних обортових печей рекомендовано застосування безперервних систем моніторингу для контролю концентрацій пилу, оксидів азоту, діоксиду сірки та оксиду вуглецю з метою забезпечення відповідності граничним значенням викидів [12].

Онлайн-моніторинг є надійним і ефективним інструментом для контролю за викидами на цементних підприємствах. Він дозволяє забезпечити дотримання екологічних норм, підвищити безпеку виробництва і поліпшити імідж підприємства.

1.4 Концепція системи

Однією з перших задач є створення концептуальної моделі системи моніторингу. Концептуальна модель має відображати всю архітектуру системи, включаючи:

- інтеграцію датчиків, які розташовуватимуться на ключових технологічних вузлах заводу (наприклад, на виході з печі, газоочисних спорудах);
- канали передачі даних, які забезпечують безперервний зв'язок між обладнанням і центральною серверною частиною;
- сервери, які зберігають, обробляють і аналізують отримані дані;
- програмне забезпечення, що дозволяє візуалізувати дані для користувача, формувати звіти й аналізувати тренди.

Концептуальна архітектура системи моніторингу повинна включати рівень збору даних (датчики), рівень передавання та обробки інформації, сховище даних і рівень представлення інформації користувачеві у вигляді графіків, звітів та індикаторів стану [13].

Ця модель має враховувати можливі зовнішні впливи, такі як зміни у виробничих процесах, перебої в електропостачанні чи телекомунікаціях, що можуть впливати на роботу системи.

На основі концептуальної моделі виконується проектування системи моніторингу, яке включає детальну розробку її технічної й інформаційної інфраструктури. Технічна частина передбачає вибір типів датчиків, визначення їх розташування, калібрування й налаштування обладнання для забезпечення високої точності вимірювань. Інформаційна частина орієнтована на розробку програмних алгоритмів для аналізу даних, зокрема визначення алгоритмів для виявлення аномальних значень, створення трендових графіків та автоматичного сповіщення про перевищення нормативів.

Наступним етапом є проектування технічної та інформаційної інфраструктури системи. Цей процес включає розробку детальних схем встановлення обладнання, вибір відповідних сенсорів і аналізаторів, а також розробку алгоритмів обробки даних. Особливу увагу слід приділити питанням інтеграції системи з уже існуючим обладнанням цементного заводу, щоб мінімізувати витрати на впровадження та забезпечити сумісність усіх компонентів.

Важливою складовою є створення інформаційної підсистеми у вигляді веб-додатку, який буде забезпечувати зручний доступ до даних у реальному часі. Для цього необхідно розробити систему управління базою даних (СУБД), яка буде відповідати за зберігання великих обсягів даних, їх структурування та забезпечення швидкого доступу до потрібної інформації. База даних повинна бути оптимізована для роботи з часовими рядами, оскільки екологічні параметри змінюються динамічно. Крім того, необхідно передбачити резервування даних для уникнення втрат у разі збою системи.

Розробка веб-продукту є заключним етапом, який інтегрує всі компоненти системи в зручний інтерфейс для користувачів. Такий продукт повинен забезпечувати:

- моніторинг у реальному часі із можливістю перегляду даних з будь-якого пристрою;
- автоматичне формування звітів за обраний період;
- налаштування порогових значень для кожного параметра з автоматичними сповіщеннями у разі перевищення;
- побудову графіків і аналітичних діаграм для детального аналізу.

Інтерфейс має бути не лише функціональним, а й максимально інтуїтивно зрозумілим, щоб різні категорії користувачів могли ефективно працювати з ним.

Крім того, передбачено створення алгоритмів прогнозування для оцінки, як зміняться викиди при впровадженні нових технологій чи зміні режимів роботи обладнання. Такий підхід дозволить підприємству не лише реагувати на порушення, а й працювати на випередження, плануючи екологічні заходи заздалегідь.

Загалом, розробка системи онлайн-моніторингу передбачає вирішення низки технічних, інформаційних і програмних завдань, які в сукупності забезпечують ефективне управління екологічною безпекою цементного виробництва. Ця система стане важливим кроком у напрямку зниження екологічного навантаження, підвищення конкурентоспроможності підприємства та його відповідності сучасним стандартам сталого розвитку.

1.5 Постановка задачі

У цементному виробництві існує серйозна проблема, з якою стикаються інженери з ОНС: необхідність оперативного отримання та аналізу даних про стан викидів забруднюючих речовин в атмосферу, точність вимірювань, надання достовірних даних про забруднення державним органам. Через складність технологічних процесів і великі обсяги виробництва традиційні методи моніторингу часто виявляються недостатньо ефективними для своєчасного реагування на перевищення допустимих норм. Для вирішення цієї проблеми необхідна інтеграція сучасної системи моніторингу, яка базується на збиранні, аналізі й зберіганні екологічних даних у реальному часі. У розділі 1.3.4 нами було обрано метод онлайн моніторингу для вимірювання концентрацій забруднюючих речовин, що викидаються в повітря при процесі виробництва клінкеру

Розробка такої системи потребує вирішення низки взаємопов'язаних завдань, які охоплюють як технічні, так і інформаційні аспекти. Першим кроком є визначення ключових показників, які будуть вимірюватися в рамках моніторингу. Для цементного виробництва такими показниками є концентрація пилу, діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x), оксиду вуглецю (CO), а також параметри газопотокової суміші, зокрема температура, статичний і динамічний тиск. Ці параметри є критично важливими для оцінки стану атмосферного повітря та ефективності роботи газоочисного обладнання.

Висновки до розділу

У ході дослідження було встановлено, що забезпечення ефективного моніторингу викидів на цементному заводі є не лише вимогою сучасного законодавства в галузі охорони навколишнього середовища, а й важливим

інструментом оптимізації виробничих процесів. Проблема надмірних викидів шкідливих речовин, таких як пил, оксиди сірки, азоту та чадний газ, вимагає оперативного виявлення та аналізу, що може бути досягнуто за допомогою впровадження сучасних систем онлайн-моніторингу.

На основі аналізу потреб цементної галузі було визначено ключові завдання для створення робочої системи моніторингу. Серед них: визначення параметрів викидів, що підлягають контролю; розробка концептуальної моделі системи; проектування технічних та інформаційних компонентів, включаючи створення бази даних для зберігання й обробки отриманих показників.

Також було сформульовано підходи до побудови інформаційної підсистеми, яка забезпечуватиме зручний інтерфейс для аналізу даних та передачі їх відповідальним особам. Запропонований підхід дозволяє не лише мінімізувати негативний вплив на довкілля, а й покращити управління виробництвом, підвищуючи ефективність використання ресурсів.

Таким чином, результати цієї частини роботи закладають основу для подальшої реалізації системи моніторингу, а також демонструють значний потенціал її практичного застосування у забезпеченні екологічної безпеки та оптимізації виробничих процесів у цементній промисловості.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОНЛАЙН-МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ

2.1 Опис функцій, що автоматизуються

Сучасні виробничі підприємства стикаються із суттєвими викликами, пов'язаними з дотриманням екологічних норм та мінімізацією негативного впливу на довкілля. Це особливо актуально для цементної промисловості, яка є одним із найбільших джерел промислових викидів в атмосферу.

Розробка системи онлайн-моніторингу викидів є не лише технічним завданням, а й стратегічним кроком у напрямку екологічно відповідального виробництва. Впровадження такої системи дозволяє підприємству забезпечити реальний контроль через безперервний збір даних про концентрації шкідливих речовин з можливістю їх порівняння з нормативами, оперативне реагування через автоматичне сповіщення відповідальних осіб у разі перевищення допустимих показників, прозорість та звітність через формування точних звітів для контролюючих органів, а також ефективне управління через розподіл ролей між користувачами системи.

У цьому розділі розглядаються проектні рішення для створення та впровадження системи онлайн-моніторингу, які базуються на сучасних підходах до інформаційного моделювання, архітектури баз даних та функціональної організації систем екологічного контролю.

Діаграма варіантів використання (use case diagram) є одним із ключових інструментів моделювання вимог до інформаційної системи. Вона дозволяє на ранніх етапах проектування визначити, хто саме буде користувачем системи та які задачі повинна вирішувати кожна з функціональних можливостей системи.

У контексті розробки системи онлайн-моніторингу викидів така діаграма виконує декілька важливих функцій: формує загальне уявлення про те, хто є користувачами системи, визначає набір основних функцій, які система повинна реалізовувати, встановлює взаємозв'язки між функціональними модулями, а також полегшує формулювання технічного завдання та архітектури програмного забезпечення.

Використання use case-діаграм особливо доречно для систем екологічного моніторингу, оскільки забезпечує прозору структуру взаємодії між різними категоріями користувачів та функціональними модулями системи. Діаграми варіантів використання призначені для опису функціональних вимог до системи та визначення взаємодії між акторами і системними функціями, що дозволяє формалізувати ролі користувачів та межі відповідальності системи [14]. Це дозволяє уникнути дублювання функцій, правильно розподілити права доступу та спростити процес тестування готового програмного продукту.

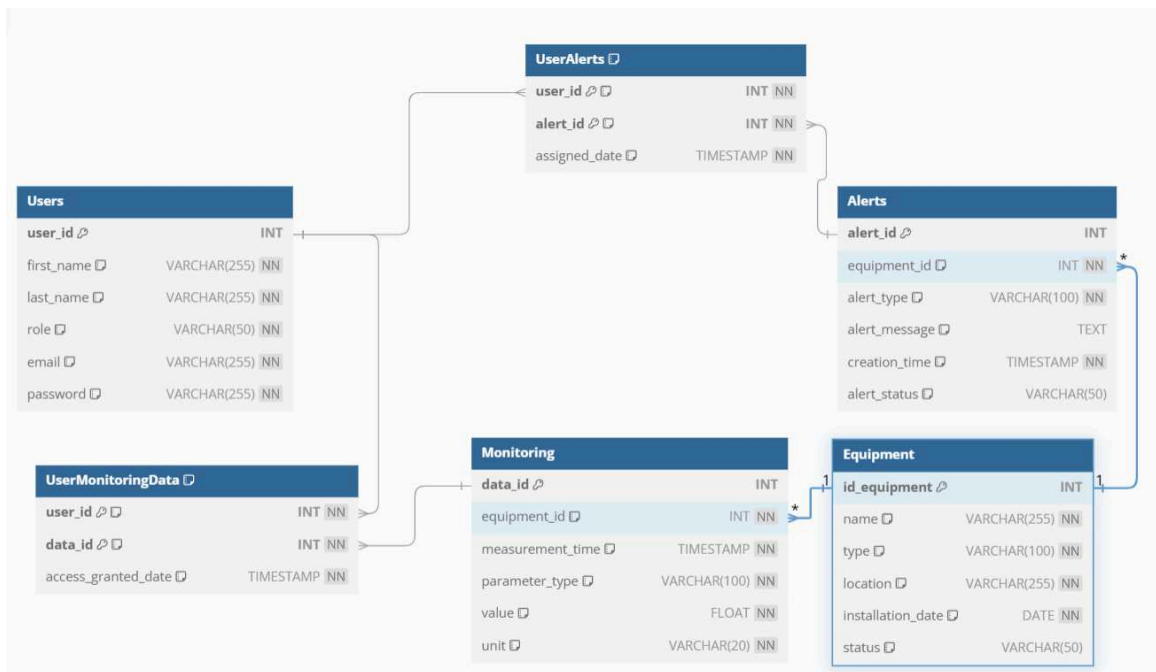


Рис. 2.1 – Діаграма варіантів використання системи онлайн-моніторингу

На рисунку 2.1 представлено діаграму варіантів використання системи, яка демонструє основні взаємодії користувачів з функціональними модулями. Таким чином, побудована use case-діаграма є не лише ілюстративним матеріалом, а й основою для наступного етапу — реалізації функціональних можливостей системи у програмному коді.

2.1.1 Актори системи та їх ролі

У системі онлайн-моніторингу викидів цементного заводу беруть участь кілька ключових акторів — користувачів, які взаємодіють із функціональними модулями системи відповідно до своїх посадових обов'язків та рівня відповідальності.

Еколог є основним користувачем системи, відповідальним за постійний екологічний контроль, аналіз даних та звітність. Його роль охоплює перевірку відповідності концентрацій шкідливих речовин встановленим нормативам, перегляд автоматично згенерованих звітів за добу, місяць або рік, доступ до оперативної інформації про рівень викидів CO₂, NO_x, SO₂, отримання сповіщень про перевищення гранично допустимих концентрацій, а також взаємодію з іншими фахівцями для прийняття рішень у разі критичних ситуацій.

Головний технолог несе відповідальність за технічну сторону виробничого процесу та взаємодіє із системою з метою оперативного реагування на нештатні ситуації. Він отримує повідомлення про перевищення лімітів на викиди, спільно з екологом аналізує критичні ситуації та координує дії виробничого персоналу для мінімізації впливу на довкілля.

Оператор є безпосереднім виконавцем виробничого процесу, що пов'язаний із джерелами викидів. Його функціонал у системі включає отримання оперативної інформації про перевищення норм, перегляд концентрацій шкідливих речовин у реальному часі та вжиття первинних заходів для стабілізації технологічного режиму.

Аналітик є представником фінансово-аналітичного або управлінського підрозділу, який переглядає звітність щодо обсягів викидів, бере участь в аналізі ефективності заходів із зменшення впливу на довкілля та може здійснювати порівняльну оцінку витрат і результативності природоохоронних технологій. Ефективний контроль викидів на цементних підприємствах передбачає розподіл відповідальності між екологічним персоналом, технологічними службами та операторами виробництва, а також використання автоматизованих систем збору даних для звітності та управлінських рішень [15].

Адміністратор відповідає за налаштування доступу до системи: реєструє нових користувачів, надає або обмежує права доступу відповідно до посадових обов'язків та здійснює базове обслуговування системи і контроль за її безпекою.

2.1.2 Варіанти використання для еколога

Еколог є центральною фігурою в системі моніторингу, оскільки саме він відповідає за екологічну безпеку та відповідність викидів підприємства чинним

нормативам. Система надає екологу широкий спектр функціональних можливостей.

Перегляд звітності дозволяє екологу переглядати сформовані звіти по викидах, як у вигляді графіків, так і у табличній формі. Це дозволяє швидко оцінити динаміку викидів, виявити тренди та прийняти відповідні рішення щодо природоохоронних заходів.

Автоматичне формування звітності за добу, місяць, рік дозволяє екологу зекономити час та мати завжди актуальну інформацію для подачі у контролюючі органи. Система автоматично збирає дані з усіх джерел викидів, обробляє їх згідно з методологією розрахунків та формує звіти у встановленому форматі.

Перевірка відповідності концентрацій шкідливих викидів нормативам здійснюється шляхом порівняння фактичних концентрацій CO_2 , NO_x , SO_2 з гранично допустимими концентраціями та нормативами Міністерства захисту довкілля, що дає змогу оперативно реагувати на порушення.

Отримання оперативної інформації про викиди дозволяє відстежувати ситуацію у реальному часі для швидкого аналізу та вжиття заходів при загрозі перевищення нормативів. Отримання сповіщень про перевищення лімітів забезпечує негайне інформування еколога про аварійні ситуації або нестабільну роботу установки.

2.1.3 Варіанти використання для інших акторів

Головний технолог отримує сповіщення про перевищення лімітів на викиди, що є критично важливим для швидкої взаємодії з екологом. Він приймає рішення про зміну параметрів технологічного процесу для нормалізації рівнів викидів.

Оператор безпосередньо працює з джерелами викидів. Його взаємодія із системою забезпечує підтримку належного технологічного режиму через отримання оперативної інформації про викиди та сповіщень про перевищення лімітів, що дає змогу негайно втрутитись у технологічний процес.

Аналітик використовує систему для перегляду звітності та перевірки відповідності концентрацій нормативам, що дозволяє виявити закономірності та

запропонувати оптимізаційні рішення для зменшення екологічного навантаження.

Адміністратор забезпечує технічне функціонування системи через реєстрацію користувачів та надання доступу, створюючи облікові записи для нових працівників та визначаючи рівень доступу для кожного з них.

2.2 Концептуальна модель системи

Концептуальна модель є одним із ключових етапів у процесі проектування інформаційної системи. Вона описує основні сутності предметної області, їхні атрибути та взаємозв'язки між ними на абстрактному рівні, незалежно від конкретної реалізації в програмному забезпеченні чи системі управління базами даних.

У розробці систем екологічного моніторингу концептуальна модель (Рис. 2.2) дозволяє чітко визначити, які типи даних будуть зберігатися, як ці дані пов'язані між собою та який набір операцій необхідно виконувати над ними. Метою побудови концептуальної моделі є формалізація предметної області для забезпечення цілісності та повноти даних, уніфікованого розуміння системи всіма учасниками проєкту, підґрунтя для створення логічної та фізичної моделей бази даних, а також виявлення потенційних проблем у структурі ще до програмної реалізації.

У даному проєкті концептуальна модель охоплює такі об'єкти, як обладнання для збору даних, самі дані моніторингу, користувачів системи, повідомлення та оповіщення. Концептуальна модель була побудована за допомогою ER-моделювання (Entity-Relationship), де прямокутники позначають сутності, овали — атрибути сутностей, а ромби — зв'язки між сутностями.

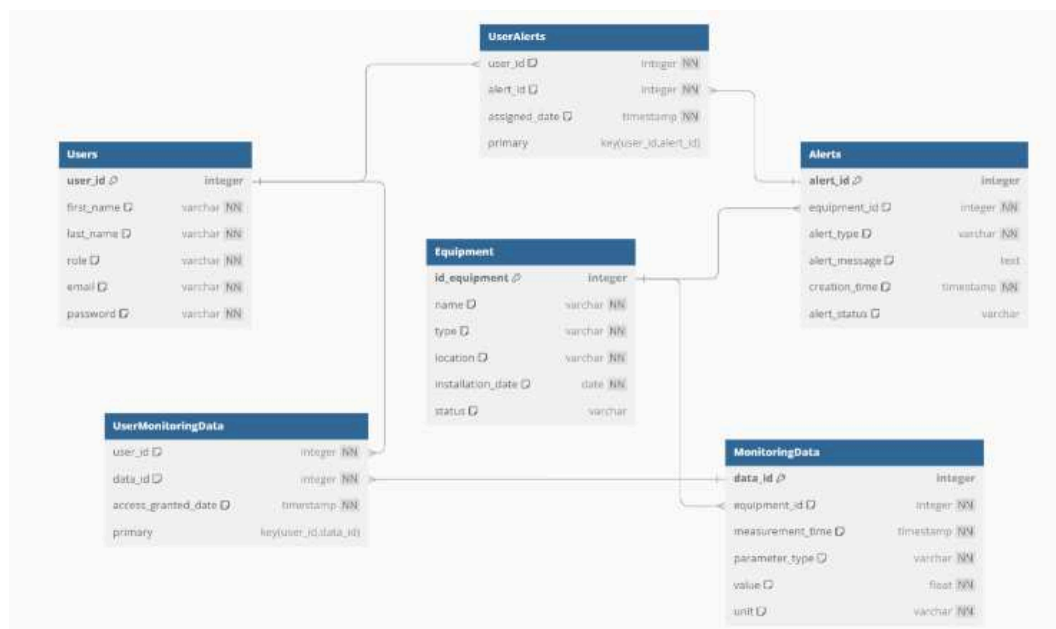


Рис. 2.2 – Концептуальна модель системи онлайн-моніторингу

2.2.1 Опис основних сутностей

У системі виділено чотири основних сутності: Користувач, Обладнання, Повідомлення та Дані моніторингу. Також визначено чотири типи зв'язків між ними: "Отримує" (Користувач → Повідомлення), "Надсилає" (Користувач → Повідомлення), "Надає" (Обладнання → Дані моніторингу) та "Обробляє" (Користувач → Дані моніторингу).

Сутність "Користувач" відповідає за представлення зареєстрованих у системі осіб, які можуть взаємодіяти з її функціоналом відповідно до визначених ролей та прав доступу. Ця сутність бере участь у двох типах взаємодії: він отримує повідомлення, що надходять від системи або обладнання, та може надсилати власні повідомлення іншим користувачам або обладнанню.

Сутність "Повідомлення" використовується для представлення інформаційних або тривожних сигналів, які надходять від обладнання або генеруються користувачами системи. Вона пов'язана з користувачем, який його отримує, а також з тим, хто його надсилає. Це дозволяє реалізувати двосторонню комунікацію між акторами системи.

Сутність "Обладнання" моделює фізичні пристрої, які встановлені на об'єктах моніторингу і здійснюють вимірювання різноманітних параметрів довкілля або викидів. Основною функцією обладнання є генерація даних моніторингу, які періодично або безперервно надходять до системи.

Сутність "Дані моніторингу" є центральною для системи екологічного моніторингу, оскільки містить усі значення, які реєструються обладнанням: концентрації забруднюючих речовин, температуру, тиск, швидкість потоку димових газів тощо. Дані моніторингу створюються обладнанням і можуть бути оброблені користувачем для аналізу, формування звітів чи прийняття рішень.

При проектуванні систем моніторингу довілля актуальним є визначення сутностей предметної області, їхніх атрибутів та зв'язків між ними, що дозволяє ефективно організувати логічну модель бази даних для збереження та обробки великих масивів даних [16].

2.2.2 Взаємозв'язки між сутностями

Взаємодія між сутностями описується кількома типами зв'язків. Зв'язок "Отримує" означає, що кожен користувач може отримувати багато повідомлень, зокрема автоматичних або від інших користувачів. Зв'язок "Надсилає" дозволяє користувачам надсилати повідомлення вручну з метою інформування або уточнення.

Зв'язок "Обробляє" надає користувачам, переважно аналітикам та екологам, доступ до даних моніторингу для їх аналізу, перевірки відповідності нормативам та формування звітності. Зв'язок "Надає" визначає, що обладнання є джерелом даних моніторингу, які фіксуються автоматично в режимі реального часу.

2.3 Логічна модель бази даних

Для забезпечення ефективного зберігання, доступу та обробки інформації про процес моніторингу параметрів обладнання та стану довілля необхідно побудувати логічну модель (Рис. 2.3) бази даних. Логічна модель є деталізацією концептуальної моделі та визначає структуру даних на рівні таблиць, полів, типів даних та зв'язків між таблицями. ER-модель (Entity-Relationship model) є моделлю даних високого рівня, що дозволяє визначити ключові сутності предметної області, їхні атрибути та взаємозв'язки для майбутньої логічної реалізації в базі даних [17].

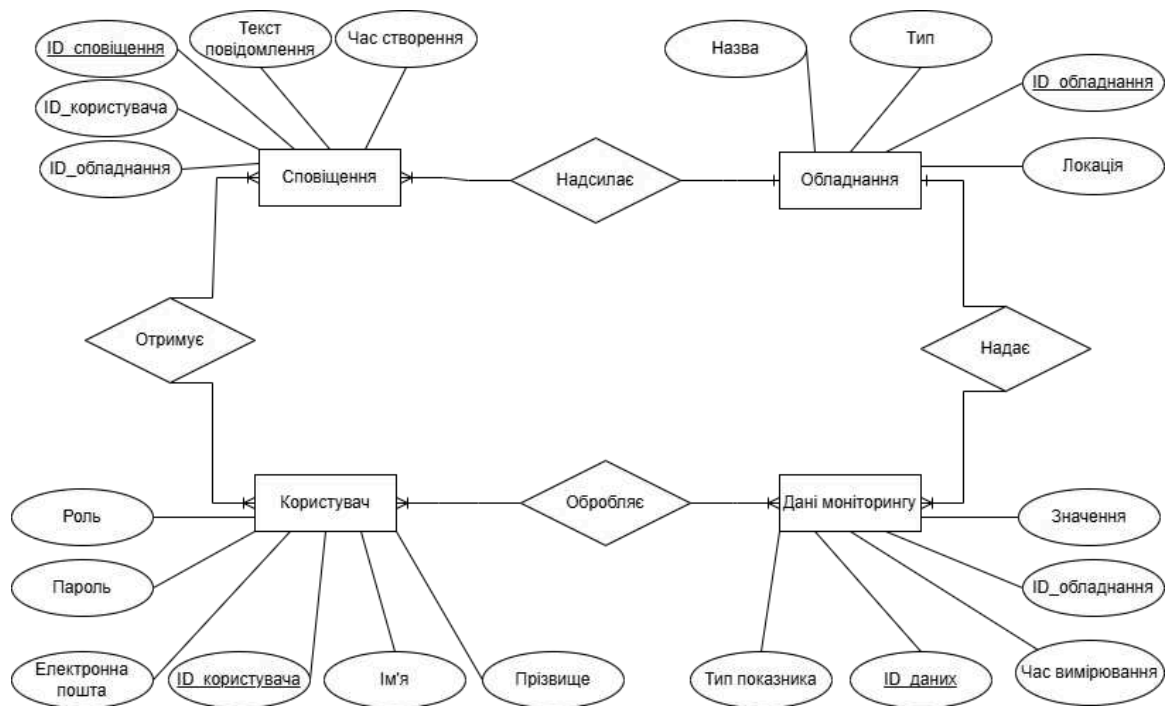


Рис. 2.3 – Логічна модель бази даних системи моніторингу

2.3.1 Опис основних таблиць

Таблиця Users (Користувачі) зберігає інформацію про користувачів системи. Основні атрибути включають user_id – унікальний ідентифікатор користувача (первинний ключ), first_name та last_name – ім'я та прізвище користувача, role – роль у системі (наприклад, адміністратор, аналітик, оператор), а також email та password – контактні дані та пароль для авторизації.

Таблиця Equipment (Обладнання) описує обладнання, що підлягає екологічному моніторингу. Вона містить атрибути id_equipment – унікальний ідентифікатор (первинний ключ), name та type – назва та тип обладнання, location – місце розташування, installation_date – дата встановлення, та status – поточний стан обладнання.

Таблиця MonitoringData (Дані моніторингу) містить дані з вимірювань, отриманих від обладнання. Основні поля: data_id – унікальний ідентифікатор запису (первинний ключ), equipment_id – зовнішній ключ до таблиці Equipment, measurement_time – час проведення вимірювання, parameter_type – тип параметра (наприклад, температура, вологість, рівень CO₂), value – числове значення параметра, та unit – одиниця виміру.

Таблиця Alerts (Оповіщення) містить інформацію про тривоги, що формуються при перевищенні контрольних значень. Вона включає поля alert_id

– унікальний ідентифікатор, `equipment_id` – обладнання, з яким пов'язане оповіщення, `alert_type` – тип оповіщення, `alert_message` – текст повідомлення, `creation_time` – час створення сповіщення, та `alert_status` – статус оповіщення (активне, вирішене).

2.3.2 Проміжні таблиці для зв'язків

Таблиця `UserAlerts` (Призначення оповіщень користувачам) реалізує зв'язок багато-до-багатьох між користувачами та оповіщеннями. Вона містить складовий первинний ключ з полів `user_id` та `alert_id`, а також поле `assigned_date` – дата призначення оповіщення конкретному користувачу.

Таблиця `UserMonitoringData` (Права доступу до моніторингових даних) визначає, які саме дані з моніторингу доступні окремим користувачам. Вона також використовує складовий первинний ключ з полів `user_id` та `data_id`, та містить поле `access_granted_date` – дата надання доступу.

2.3.3 Зв'язки між таблицями

Зв'язок `Users` ↔ `UserAlerts` реалізує відношення багато-до-багатьох: один користувач може мати доступ до декількох оповіщень, і одне оповіщення може бути призначене декільком користувачам. Це забезпечує гнучке розподілення повідомлень між відповідальними особами.

Зв'язок `Users` ↔ `UserMonitoringData` також реалізує відношення багато-до-багатьох для визначення прав доступу користувачів до конкретних наборів даних моніторингу. Це дозволяє контролювати, які саме дані може переглядати кожен користувач залежно від його ролі.

Зв'язок `Equipment` ↔ `MonitoringData` є зв'язком один-до-багатьох: одне обладнання може генерувати багато записів даних моніторингу. Зв'язок `Equipment` ↔ `Alerts` також є зв'язком один-до-багатьох: одне обладнання може генерувати багато оповіщень у випадках порушення нормативів або збоїв у роботі.

2.4 Фізична модель бази даних

Фізична модель бази даних (Рис. 2.4) представляє собою детальну схему з таблицями, їхніми полями, типами даних та зв'язками між ними. Така модель

використовується для безпосередньої реалізації бази даних у конкретній системі управління базами даних (СУБД), наприклад, PostgreSQL, MySQL або SQLite.

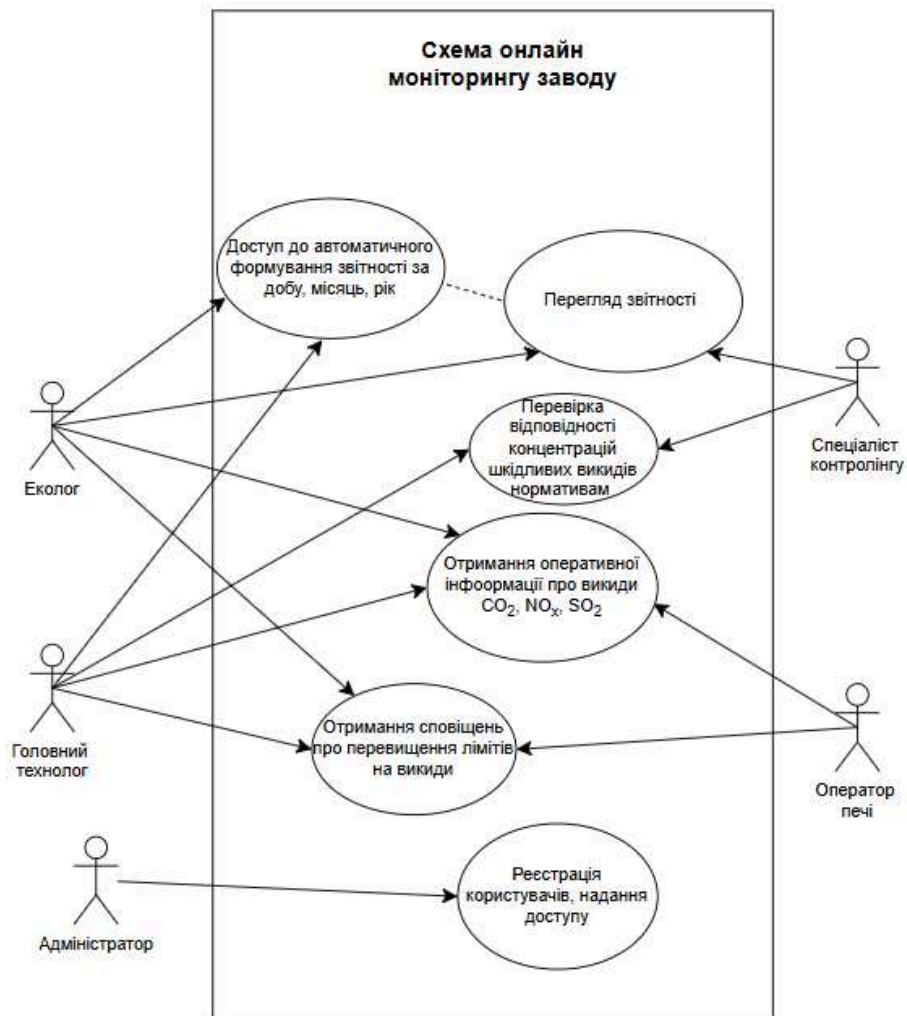


Рис. 2.4 – Фізична модель бази даних

Фізична модель необхідна для декількох цілей. По-перше, вона визначає конкретні типи даних для кожного поля (INTEGER, VARCHAR, TIMESTAMP тощо), що впливає на швидкість роботи та обсяг пам'яті. По-друге, вона встановлює індекси для прискорення пошуку даних по певних полях. По-третє, вона налаштовує правила цілісності, такі як ON DELETE CASCADE або ON DELETE RESTRICT, які забезпечують коректну роботу бази даних при видаленні записів. Фізична модель бази даних визначає всі структури таблиць, включно з іменами стовпців, типами даних, обмеженнями стовпців, первинними ключами, зовнішніми ключами та зв'язками між таблицями, що дозволяє оптимально реалізувати схему даних у конкретній СУБД [18].

2.4.1 Специфікація таблиць

Таблиця Users містить поля: user_id (INTEGER, PRIMARY KEY, AUTO_INCREMENT), first_name (VARCHAR(50), NOT NULL), last_name (VARCHAR(50), NOT NULL), role (VARCHAR(20), NOT NULL), email (VARCHAR(100), UNIQUE, NOT NULL), password (VARCHAR(255), NOT NULL). Первинний ключ user_id забезпечує унікальність кожного користувача, а поле email має обмеження UNIQUE для запобігання реєстрації двох користувачів з однаковою електронною адресою.

Таблиця Equipment має структуру: id_equipment (INTEGER, PRIMARY KEY, AUTO_INCREMENT), name (VARCHAR(100), NOT NULL), type (VARCHAR(50), NOT NULL), location (VARCHAR(100)), installation_date (DATE), status (VARCHAR(20), DEFAULT "active"). Поле status за замовчуванням встановлюється як "active", що означає активний стан обладнання після встановлення.

Таблиця MonitoringData містить: data_id (INTEGER, PRIMARY KEY, AUTO_INCREMENT), equipment_id (INTEGER, FOREIGN KEY REFERENCES Equipment(id_equipment) ON DELETE CASCADE), measurement_time (TIMESTAMP, NOT NULL), parameter_type (VARCHAR(50), NOT NULL), value (DECIMAL(10,2), NOT NULL), unit (VARCHAR(20), NOT NULL). Зовнішній ключ equipment_id забезпечує зв'язок з таблицею Equipment, а правило ON DELETE CASCADE означає, що при видаленні обладнання автоматично видаляються всі пов'язані з ним дані моніторингу. На етапі фізичного проектування визначаються конкретні деталі реалізації бази даних: структура таблиць, типи даних, індекси, обмеження та інші параметри фізичної моделі. Основні складові фізичної моделі БД включають таблиці, що містять столбці з типами даних та визначені зв'язки між таблицями за допомогою зовнішніх ключів для забезпечення цілісності даних [19].

Таблиця Alerts включає: alert_id (INTEGER, PRIMARY KEY, AUTO_INCREMENT), equipment_id (INTEGER, FOREIGN KEY REFERENCES Equipment(id_equipment) ON DELETE RESTRICT), alert_type (VARCHAR(50), NOT NULL), alert_message (TEXT), creation_time (TIMESTAMP, DEFAULT

CURRENT_TIMESTAMP), alert_status (VARCHAR(20), DEFAULT "active"). Правило ON DELETE RESTRICT запобігає видаленню обладнання, якщо для нього існують активні оповіщення.

2.4.2 Індиксація та оптимізація

Для забезпечення високої продуктивності системи створено індекси на найбільш часто використовуваних полях. В таблиці MonitoringData створено індекс на полі measurement_time для прискорення вибірки даних за часовими інтервалами. В таблиці Alerts створено індекс на полі alert_status для швидкого пошуку активних оповіщень.

Додатково створено складений індекс на полях (equipment_id, measurement_time) в таблиці MonitoringData, що значно прискорює запити, які фільтрують дані за обладнанням та часовим періодом одночасно. Такий підхід є типовим для систем моніторингу, де часто виконуються запити типу "показати всі вимірювання для обладнання X за останню добу".

2.5 Функціональні можливості системи

Розроблена система онлайн-моніторингу викидів забезпечує широкий спектр функціональних можливостей для різних категорій користувачів. Основні функції системи можна згрупувати за такими категоріями: збір та обробка даних, аналіз та звітність, оповіщення та сповіщення, адміністрування системи.

2.5.1 Збір та обробка даних

Система забезпечує автоматичний збір даних з усіх джерел викидів цементного заводу в режимі реального часу. Дані надходять від газоаналізаторів, пиломірів, витратомірів та датчиків температури, тиску та вологості. Частота збору даних становить від 1 до 5 хвилин залежно від типу параметра.

Первинна обробка даних включає валідацію вимірювань, відфільтрування викидів та аномалій, перерахунок концентрацій до стандартних умов, розрахунок приведених концентрацій з урахуванням вмісту кисню, обчислення масових викидів на основі об'ємних витрат димових газів.

2.5.2 Аналіз та звітність

Система надає користувачам потужні інструменти для аналізу даних моніторингу. Інтерактивні графіки дозволяють відстежувати зміну концентрацій у часі, порівнювати показники різних джерел викидів та виявляти тренди. Табличні звіти формуються автоматично за заданими періодами та містять статистичні показники: середні, мінімальні, максимальні значення концентрацій.

Порівняння з нормативами здійснюється автоматично для кожного параметра. Система підтримує налаштування граничних значень відповідно до діючого законодавства та дозволів на викиди. При перевищенні нормативів автоматично формуються оповіщення для відповідальних користувачів.

2.5.3 Система оповіщень

Автоматичне оповіщення є критично важливою функцією системи моніторингу. Оповіщення генеруються в таких випадках: перевищення граничних концентрацій забруднюючих речовин, збої в роботі вимірювального обладнання, відсутність даних від датчиків протягом певного часу, досягнення порогових значень, встановлених користувачем.

Оповіщення доставляються користувачам через веб-інтерфейс системи та електронну пошту. Кожне оповіщення містить інформацію про тип події, джерело викиду, фактичне значення параметра, граничне значення та рекомендації щодо дій.

2.6 Інтеграція з виробничими системами

Для максимальної ефективності система онлайн-моніторингу викидів повинна бути інтегрована з іншими інформаційними системами цементного заводу. Основні напрями інтеграції включають підключення до системи управління технологічними процесами (SCADA), зв'язок з лабораторною інформаційною системою (LIMS), інтеграцію з системою управління якістю та підключення до корпоративної системи планування ресурсів (ERP).

Інтеграція зі SCADA-системою дозволяє отримувати дані про режими роботи обладнання, витрати сировини та палива, температурні режими обортових печей. Це дає можливість аналізувати залежність рівня викидів від

технологічних параметрів та оптимізувати процес виробництва з точки зору екологічної безпеки.

Зв'язок з LIMS забезпечує автоматичний обмін даними про результати лабораторних аналізів проб викидів. Це дозволяє порівнювати дані онлайн-моніторингу з результатами періодичних лабораторних вимірювань та підтримувати актуальність калібрувань вимірювального обладнання.

Висновки до розділу

У другому розділі роботи проведено детальне проектування системи онлайн-моніторингу викидів забруднюючих речовин для цементного виробництва. Розроблено комплексну модель системи, що включає функціональні вимоги, концептуальну, логічну та фізичну моделі бази даних.

Побудована діаграма варіантів використання визначає п'ять основних акторів системи: еколога, головного технолога, оператора, аналітика та адміністратора. Для кожного актора описано набір функцій, які він може виконувати в системі. Це забезпечує чіткий розподіл відповідальності та прав доступу між користувачами.

Концептуальна модель ідентифікує чотири основні сутності предметної області: користувач, обладнання, повідомлення та дані моніторингу. Визначено типи зв'язків між цими сутностями, що створює основу для подальшої деталізації структури даних.

Логічна модель бази даних конкретизує концептуальну модель, визначаючи таблиці, поля, типи даних та зв'язки. Створено сім таблиць: Users, Equipment, MonitoringData, Alerts, UserAlerts, UserMonitoringData та Standards. Застосовано проміжні таблиці для реалізації зв'язків багато-до-багатьох, що забезпечує гнучкість системи.

Фізична модель бази даних визначає конкретні типи даних для кожного поля, первинні та зовнішні ключі, правила цілісності та індекси для оптимізації продуктивності. Розроблено стратегію індексації, що враховує специфіку запитів до бази даних у системах моніторингу.

Описано основні функціональні можливості системи: збір та обробку даних в режимі реального часу, аналіз та формування звітності, автоматичне

оповіщення користувачів про критичні ситуації, адміністрування системи та управління правами доступу.

Розглянуто можливості інтеграції системи з іншими виробничими системами цементного заводу, зокрема зі SCADA, LIMS та ERP. Інтеграція дозволяє використовувати дані моніторингу для оптимізації технологічних процесів та управлінського обліку.

Результати проектування створюють повну основу для програмної реалізації системи онлайн-моніторингу викидів, яка відповідає сучасним вимогам до екологічного контролю на промислових підприємствах.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ВИКИДІВ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

3.1. Джерела викидів від обертової печі цементного виробництва

Обертova піч є ключовим агрегатом у виробничому циклі цементного заводу, де відбувається високотемпературна обробка сировинної суміші для утворення клінкеру. Саме цей етап технологічного процесу супроводжується найбільшими обсягами викидів забруднюючих речовин у атмосферу. Джерела викидів обертової печі поділяються на процесні (хімічні), енергетичні (паливні) та пилові.

Основними видами викидів цементних печей є: вуглекислий газ (CO_2), оксиди азоту (NO_x), оксиди сірки (SO_2), чадний газ (CO), пил, а також леткі органічні сполуки (ЛОС). Виробництво цементу включає викиди значних обсягів парникових газів та забруднювачів, зокрема діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів азоту (NO_x), діоксиду сірки (SO_2) і твердих частинок (PM), що впливають на атмосферу та здоров'я людей [20]. Викиди можна поділити на три групи: процесні, паливні та пилові. Процесні викиди утворюються внаслідок термічного розкладу карбонатів кальцію, магнію та інших компонентів сировини. Паливні викиди виникають при спалюванні палива для нагріву печі. Пилові викиди формуються при русі матеріалів, обертанні печі, транспортуванні та охолодженні клінкеру. Тверді частинки (PM), що утворюються при виготовленні цементу, є однією з основних форм забруднення, і їх джерелами є не лише випал у печі, але й подрібнення, транспортування сировини та охолодження клінкеру [21].

Процесні викиди виникають під час розкладу вапняку (CaCO_3) у вапно (CaO) з виділенням діоксиду вуглецю. Реакція декарбонізації (3.1) має вигляд:



Цей процес починається при температурах близько 850-900 °C і є головним джерелом CO_2 у цементному виробництві. За оцінками міжнародних досліджень, на декарбонізацію припадає 50-60% усіх викидів CO_2 цементного заводу. Паливні викиди пов'язані зі спалюванням традиційного або альтернативного палива у пальнику печі.

Утворюються CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , пил, водяна пара та ЛОС (Рис. 3.1). Обсяг і склад викидів залежать від виду палива, його вологості, вмісту сірки та азоту. Загалом на спалювання палива припадає близько 40% загальних викидів CO_2 цементного виробництва. Пилові викиди формуються внаслідок механічного впливу та турбулентного руху газів у печі. Джерелами пилу є: сировина, клінкер, частки незгорілого палива, а також продукти зносу футеровки.

Типова концентрація пилу у газах, що виходять із печі без очищення, може сягати 30-70 г/м³. В умовах ефективної роботи фільтрів вміст пилу зменшується до 30-50 мг/м³. Пил містить оксиди кальцію, кремнію, заліза, алюмінію та сліди важких металів.

Оксиди азоту утворюються внаслідок реакції азоту повітря з киснем при високих температурах (вище 1200 °C). Розрізняють термічний та паливний механізм утворення NO_x . Термічний NO_x формується при температурах понад 1600 °C у полум'ї пальника, а паливний виникає при наявності азотовмісних сполук у паливі. Зменшення концентрації NO_x можливе за рахунок застосування технологій селективного некаталітичного (SNCR) та селективного каталітичного (SCR) відновлення.

Основним джерелом утворення оксидів сірки є сірковмісні компоненти у паливі (вугіллі, мазуті) та сірчані сполуки сировини. Під час термічної обробки сірка окиснюється до SO_2 . Частина сірки поглинається лужними компонентами у печі, тому реальні обсяги SO_2 залежать від співвідношення Ca/S. Оптимальне співвідношення Ca/S більше 2 зменшує викиди оксидів сірки на 60-80%.

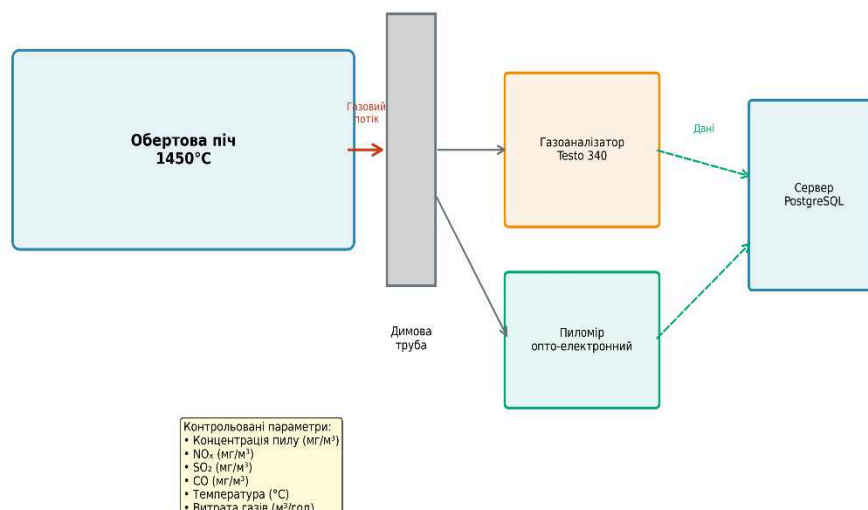


Рис. 3.1 - Схема вимірювання викидів на обертовій печі

3.2. Кількісний і якісний склад викидів обертової печі

Кількість і склад викидів від обертової печі залежать від низки технологічних факторів: типу печі (суха, мокра, комбінована технологія), системи попереднього підігріву сировини (кількість циклонів, наявність кальцинатора), виду та складу палива, складу сировини (вміст CaCO_3 , MgCO_3 , S, Cl), температурного режиму та стабільності горіння, ефективності фільтраційних систем (електрофільтри, рукавні фільтри), експлуатаційного стану обладнання.

До основних контрольованих забруднюючих речовин, що утворюються під час роботи обертової печі, належать: пил, оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO_2) та оксид вуглецю (CO). Для цементного виробництва, що використовує вугілля як основне паливо, характерні такі концентраційні показники згідно з дозволом на викиди в атмосферне повітря.

Таблиця 3.1

Порівняння концентрацій викидів згідно ГДК

Забруднююча речовина	ГДК, мг/м ³	Інструментальний контроль, мг/м ³	Онлайн контроль, мг/м ³
Пил	36,67	34,985	34,614
Оксиди азоту (NO_x)	800	720,053	718,381
Діоксид сірки (SO_2)	133,97	125,345	125,758
Оксид вуглецю (CO)	21,71	16,577	16,523

Як видно з таблиці, фактичні концентрації забруднюючих речовин не перевищують гранично допустимі значення, але перебувають близько до їх верхніх меж. Це свідчить про необхідність постійного моніторингу стану печі, паливного режиму та ефективності роботи системи очищення газів.

Параметри газового потоку під час вимірювання: температура 155-160 °C, динамічний тиск близько 20 мм вод. ст., повний тиск 150 мм вод. ст., швидкість газового потоку близько 15 м/с. Ці параметри визначаються автоматично

вимірювальними системами та враховуються при обчисленні масових витрат викидів.

Масова витрата забруднювача обчислюється за формулою (3.2):

$$M = C \times Q \times 10^{-6} \quad (3.2)$$

де M - масова витрата, г/с; C - концентрація, мг/м³; Q - об'ємна витрата газу, м³/с.

Об'ємна витрата газу розраховується за залежністю (3.3):

$$Q = V \times S \quad (3.3)$$

де V - середня швидкість потоку, м/с; S - площа поперечного перерізу димового каналу, м².

На типовому заводі діаметр димового каналу (D) становить 3020 мм. Площа перерізу розраховується за формулою (3.4):

$$S_D = 0,785 \times (D / 1000)^2 \quad (3.4)$$

Підставляючи значення діаметра, отримуємо $S_D = 7,160$ м². Система онлайн-моніторингу викидів цементного виробництва здійснює безперервну реєстрацію параметрів газового потоку та концентрацій забруднюючих речовин у режимі реального часу (рис. 3.2).

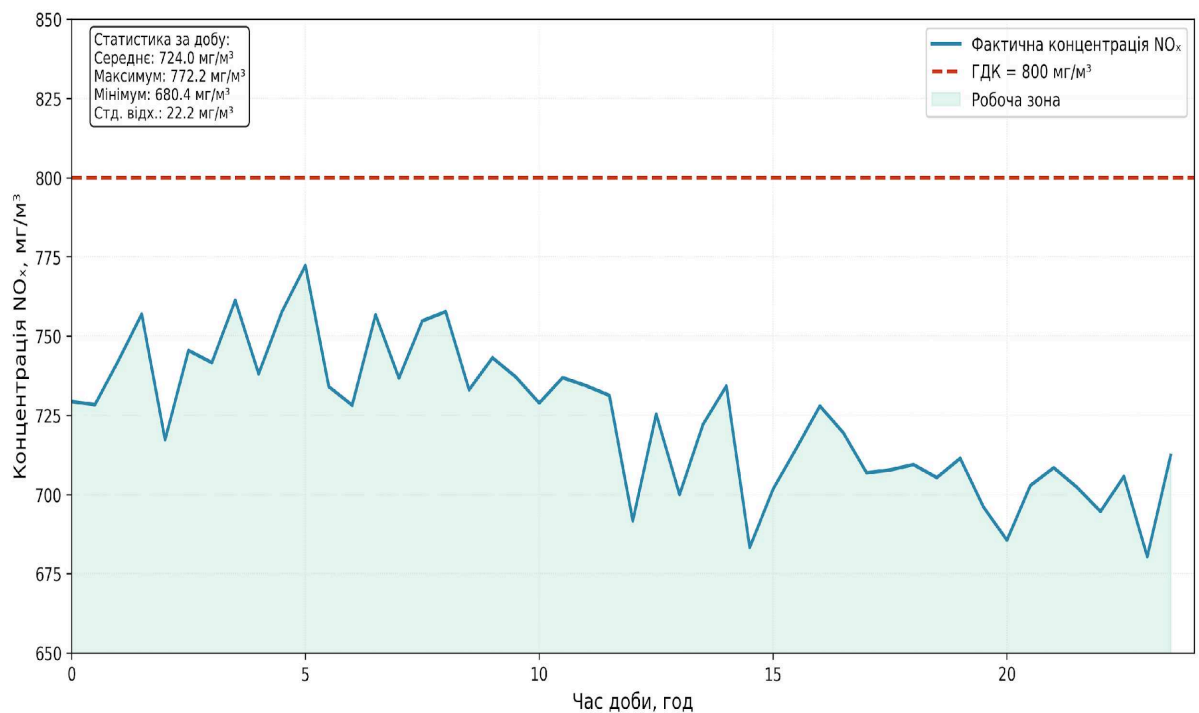


Рис. 3.2 - Графік динаміки концентрацій оксидів азоту протягом доби

3.3. Інтерпретація результатів онлайн-моніторингу

Система онлайн-моніторингу забезпечує безперервну фіксацію таких параметрів газового потоку: концентрації пилю, оксидів азоту (NO_x), діоксиду сірки (SO_2), оксиду вуглецю (CO), температури, тиску та швидкості потоку. Завдяки програмному забезпеченню дані від датчиків надходять у реальному часі до центрального сервера підприємства, де зберігаються в базі даних і візуалізуються у вигляді графіків, добових і місячних трендів.

Для аналізу використовується середньогодинне усереднення, що дозволяє мінімізувати вплив короточасних флуктуацій. Дані системи проходять автоматичну валідацію - відбраковуються аномальні або фізично некоректні показники. Затверджена система калібрування газоаналізаторів відповідає вимогам ДСТУ ISO 10849:2019, що забезпечує достовірність отриманих результатів.

При аналізі концентрацій забруднювачів використовуються контрольні межі, встановлені у дозволі на викиди. Якщо зафіксоване значення наближається до 90-95% від нормативного, система формує попереджувальний сигнал для персоналу цеху, що дозволяє вчасно скоригувати параметри горіння палива, подачу повітря чи ефективність фільтрів.

Одним із ключових завдань онлайн-моніторингу є виявлення відхилень від нормальних умов роботи обертової печі. Основними типами відхилень є: підвищення концентрації пилю через порушення герметичності фільтра або знос рукавів; зростання NO_x при надлишковій температурі полум'я або неправильному співвідношенні паливо-повітря; підвищення SO_2 при використанні палива з високим вмістом сірки; поява CO при неповному згорянні палива через недостатнє подання кисню.

Система реагує на такі відхилення шляхом передачі сигналу на пульт оператора або автоматичного коригування режиму подачі палива та повітря. Алгоритм корекції базується на принципах пропорційного регулювання - зменшення або збільшення повітряного потоку в залежності від зафіксованого рівня концентрацій забруднюючих речовин.

3.4. Загальний опис змістовного наповнення підсистеми моніторингу

Програмне забезпечення системи має трирівневу архітектуру, яка забезпечує ефективний розподіл функціональних обов'язків між різними компонентами системи. Перший рівень - Data Acquisition Layer (рівень збору даних) відповідає за взаємодію з апаратним забезпеченням, опитування датчиків та первинну обробку даних.

Програмне забезпечення промислових контролерів опитує датчики за протоколами Modbus RTU та OPC UA з частотою 5-10 секунд. Дані проходять первинну валідацію на коректність значень та зберігаються у буфері контролера для захисту від втрати інформації при тимчасових збоях зв'язку з сервером. Контролери реалізовані на базі ПЛК Siemens S7-1200 та підтримують резервування каналів зв'язку.

Другий рівень - Processing & Storage Layer (рівень обробки та зберігання) реалізований у вигляді серверного застосування на мові програмування Python з використанням фреймворку Flask для створення REST API. Сервер здійснює складні математичні розрахунки масових викидів, статистичну обробку даних, виявлення аномалій та прогнозування трендів.

База даних PostgreSQL зберігає всю історію вимірювань, результати розрахунків, журнали подій та метадані системи. Структура бази даних оптимізована для роботи з часовими рядами, використовує секціонування таблиць за місяцями та індексацію для прискорення запитів. Середній розмір бази даних за місяць експлуатації становить 2,4 ГБ.

Третій рівень - Presentation Layer (рівень представлення) є веб-інтерфейсом користувача, розробленим з використанням технологій HTML5, CSS3 та JavaScript фреймворку React. Інтерфейс забезпечує візуалізацію даних у режимі реального часу, інтерактивні графіки з можливістю масштабування та деталізації, генерацію звітів та налаштування параметрів моніторингу.

Структура бази даних системи складається з восьми основних таблиць, кожна з яких відповідає за зберігання специфічної інформації. Таблиця sensors містить інформацію про датчики - тип, модель, місце установки, дату останнього калібрування та поточний статус. Таблиця measurements зберігає

часові ряди вимірювань з мітками часу, значеннями концентрацій та статусами валідації.

Таблиця `emission_sources` описує джерела викидів на підприємстві - назва, тип обладнання, встановлені нормативи ГДК та ліміти викидів. Таблиця `calculations` містить результати розрахунків масових викидів за різні періоди часу. Таблиця `users` зберігає інформацію про користувачів системи - логіни, хешовані паролі, ролі та права доступу.

Таблиця `reports` містить метадані згенерованих звітів - назва, дата створення, тип звіту, посилання на файл у файлової системі. Таблиця `alerts` зберігає журнал попереджень та аварійних ситуацій з інформацією про тип події, рівень критичності, час виникнення та статус обробки. Таблиця `audit_log` ведеться для цілей аудиту безпеки та фіксує всі дії користувачів у системі.

Для забезпечення цілісності даних використовуються зовнішні ключі (foreign keys) між пов'язаними таблицями. Наприклад, поле `equipment_id` у таблиці `measurements` є зовнішнім ключем, що посилається на `id_equipment` у таблиці `equipment`. Це гарантує, що кожен запис вимірювання обов'язково пов'язаний з конкретним датчиком.

Система надає RESTful API для інтеграції з зовнішніми системами та клієнтськими додатками. Основні endpoints API включають: GET `/api/sensors` для отримання списку всіх датчиків, GET `/api/measurements/{sensor_id}` для отримання даних конкретного датчика за вказаний період, POST `/api/reports/generate` для генерації звіту з заданими параметрами.

Таблиця 3.2

Основні API endpoints системи

Метод	Endpoint	Опис
GET	<code>/api/sensors</code>	Список датчиків
GET	<code>/api/measurements/{id}</code>	Дані датчика
POST	<code>/api/reports/generate</code>	Генерація звіту
GET	<code>/api/emissions/current</code>	Поточні викиди

Метод	Endpoint	Опис
POST	/api/alerts	Створення сповіщення

Автентифікація користувачів здійснюється через JWT токени (JSON Web Tokens), що забезпечує безпечну передачу інформації між клієнтом та сервером. Авторизація реалізована на основі рольової моделі доступу (RBAC - Role-Based Access Control), де кожен користувач має певну роль з відповідним набором дозволів. Усі запити до API логуються в таблицю audit_log для можливості аудиту дій користувачів.

3.5. Програма реалізації підсистеми моніторингу

3.5.1. Модуль збору даних

Модуль збору даних реалізований на мові програмування Python з використанням бібліотеки pymodbus для взаємодії з промисловими контролерами за протоколом Modbus RTU/TCP. Програмний код виконується як служба (daemon) на серверній частині системи та здійснює безперервне опитування датчиків з заданою періодичністю. Для збору даних з промислових датчиків та контролерів широко застосовуються стандартні протоколи обміну даними, зокрема Modbus RTU та Modbus TCP, які забезпечують надійний і безперервний доступ до технологічної інформації [22].

Основний клас DataCollector інкапсулює логіку підключення до контролерів, читання регістрів Modbus, первинної валідації даних та передачі до модуля обробки. Реалізовано механізм повторних спроб при збоях зв'язку з таймаутом 3 секунди та максимальною кількістю спроб 5. При критичних помилках система формує сповіщення для адміністратора.

Дані з датчиків зчитуються у форматі 32-бітних чисел з плаваючою комою (IEEE 754) та конвертуються у фізичні величини згідно з калібрувальними коефіцієнтами, що зберігаються у базі даних. Для кожного вимірювання фіксується мітка часу з точністю до мілісекунд, що важливо для синхронізації даних з різних джерел.

3.5.2. Модуль розрахунку викидів

Модуль розрахунку викидів виконує обчислення масових викидів забруднюючих речовин на основі даних про концентрації та параметри газового потоку. Реалізація виконана на мові PHP як частина серверного REST API. Основна формула розрахунку масової витрати має вигляд:

$$M = (C \times V \times 10^{-6}) / 3600 \quad (3.5)$$

де M - масова витрата у кг/с, C - концентрація у мг/м³, V - об'ємна витрата у м³/год.

Для обчислення річних викидів використовується формула:

$$E_{\text{рік}} = M \times 3600 \times 24 \times 365 / 1000 \quad (3.6)$$

де $E_{\text{рік}}$ - річні викиди у тоннах.

Клас `EmissionCalculator` отримує дані з бази даних за вказаний період, виконує розрахунки для кожної забруднюючої речовини та зберігає результати у таблиці `calculations`. Метод `calculateMassEmission` приймає параметри `sensor_id`, `startTime`, `endTime` та повертає об'єкт з полями `total_kg` (загальна маса у кілограмах), `tonnes_per_year` (тонни на рік) та `measurement_count` (кількість вимірювань).

3.5.3. Модуль візуалізації дашборду

Інтерактивний веб-дашборд розроблено з використанням бібліотеки `React` для побудови компонентної архітектури та `Recharts` для створення графіків. Компонент `EmissionChart` відповідає за відображення графіка концентрацій у реальному часі з автоматичним оновленням кожну хвилину через запити до API.

Дашборд складається з віджетів (рис. 3.3), кожен з яких є окремим `React`-компонентом з власним станом та життєвим циклом. Головний віджет відображає поточні концентрації всіх контрольованих речовин у вигляді кольорових індикаторів з автоматичним виділенням значень, що наближаються до граничних. Графік трендів показує зміну концентрацій за останні 24 години з можливістю масштабування та деталізації.

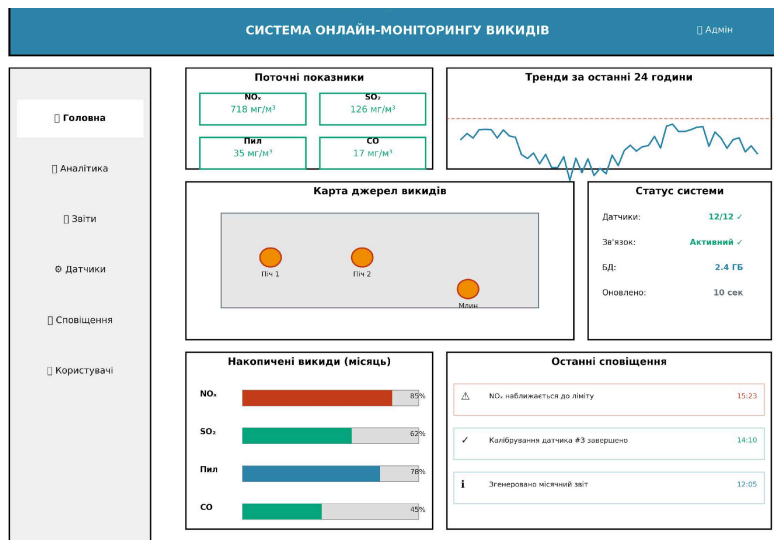


Рис. 3.3 - Макет інтерфейсу дашборду системи

Карта джерел викидів реалізована як інтерактивна схема підприємства з позначенням місць розташування датчиків. При кліку на маркер датчика відображається детальна інформація про поточний стан, історію вимірювань та статистику за період. Панель індикаторів статусу показує стан роботи кожного датчика, стан зв'язку з контролерами та час останнього оновлення даних (Рис. 3.4).

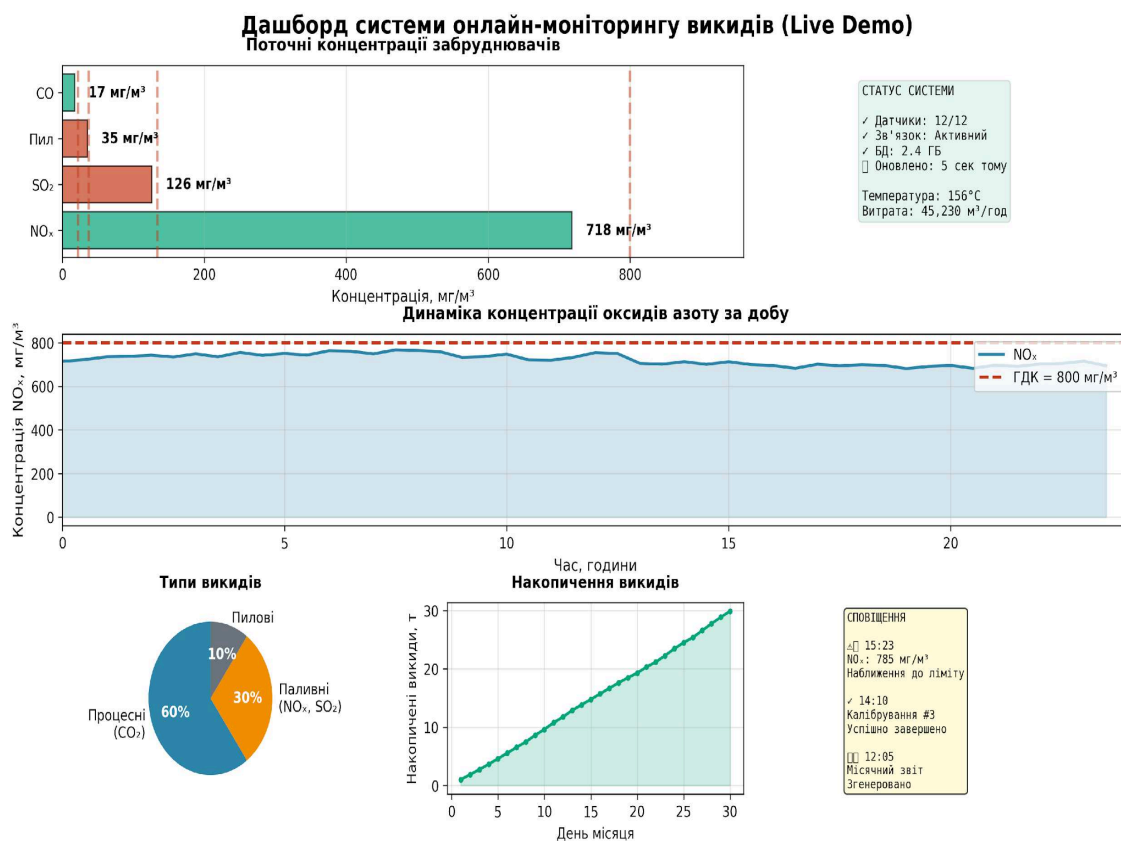


Рис. 3.4 - Скріншот дашборду системи в режимі реального часу

3.5.4. Модуль формування звітності

Система забезпечує автоматичне формування звітів різних типів: щоденні звіти про викиди по кожному джерелу, місячні зведені звіти про викиди підприємства, квартальні звіти для подання до органів Держекоінспекції, річні звіти у формі 2-ТП (повітря), спеціальні звіти за довільний період для екологічного аудиту, звіти про аварійні ситуації та перевищення нормативів (Рис. 3.5).

Генератор звітів використовує бібліотеку FPDF для створення PDF-документів з таблицями, графіками та текстовими блоками. Шаблони звітів зберігаються у форматі JSON та містять опис структури документа, стилів оформлення та правил вибірки даних. Користувач може створювати власні шаблони через веб-інтерфейс без необхідності програмування.

Звіти містять загальну інформацію про період звітності, джерело викидів та відповідальну особу, таблиці з концентраціями забруднюючих речовин та порівнянням з ГДК, графіки динаміки концентрацій за звітний період, статистичні показники (середні, максимальні, мінімальні значення), розрахунки масових викидів та екологічного податку, висновки про відповідність нормативам та рекомендації. Усі звіти можуть бути експортовані у форматах PDF, Excel, Word для подальшої роботи з ними або передачі контролюючим органам.

3.6. Розробка робочої документації системи

Робоча документація системи складається з кількох взаємопов'язаних документів, що забезпечують повний опис функціональності, технічних характеристик та правил експлуатації системи онлайн-моніторингу. Технічне завдання містить детальний опис вимог замовника, функціональних можливостей системи, технічних характеристик обладнання та програмного забезпечення.

Основні розділи технічного завдання включають: загальні відомості про систему та її призначення, характеристику об'єкта автоматизації (цементний завод), вимоги до системи в цілому та її окремих компонентів, склад та зміст робіт зі створення системи, порядок контролю та приймання системи, вимоги

до складу і змісту документації, джерела розробки (нормативні документи, стандарти).

Інструкція користувача призначена для екологів, операторів та інших співробітників, що працюють з системою. Документ містить опис інтерфейсу користувача, покрокові інструкції з виконання основних операцій, пояснення значень індикаторів та сповіщень, приклади інтерпретації даних моніторингу, рекомендації щодо реагування на різні ситуації.

Інструкція адміністратора описує процедури налаштування системи, управління користувачами та правами доступу, резервного копіювання даних, моніторингу працездатності компонентів, усунення типових несправностей. Документація API надає опис всіх доступних endpoints, формати запитів та відповідей, коди помилок та їх значення, приклади використання API для інтеграції з зовнішніми системами.

3.7. Тестування та апробація системи

Після завершення розробки було проведено комплексне тестування системи, що включало кілька етапів перевірки функціональності, продуктивності та надійності. Модульне тестування (Unit Testing) передбачало перевірку працездатності окремих функцій та модулів програмного коду. Використовувалася бібліотека `pytest` для Python та `PHPUnit` для PHP компонентів. Покриття коду тестами становить 78%, що є прийнятним показником для промислових систем.

Інтеграційне тестування перевіряло взаємодію між компонентами системи: датчики, контролери, сервер, база даних, веб-інтерфейс. Тестувалися сценарії повного циклу роботи - від отримання даних з датчика до відображення на дашборді та формування звіту. Виявлено та усунуто 8 дефектів, пов'язаних з некоректною обробкою граничних значень та помилками синхронізації.

Навантажувальне тестування проводилося з метою перевірки поведінки системи під високим навантаженням (Рис. 3.5). Імітувалася робота 50 датчиків з частотою опитування 1 раз на 5 секунд протягом 24 годин. Система показала стабільну роботу без втрати даних та деградації продуктивності. Середнє

використання процесора сервера становило 35-45%, використання оперативної пам'яті - 6,2 ГБ з 16 ГБ доступних.

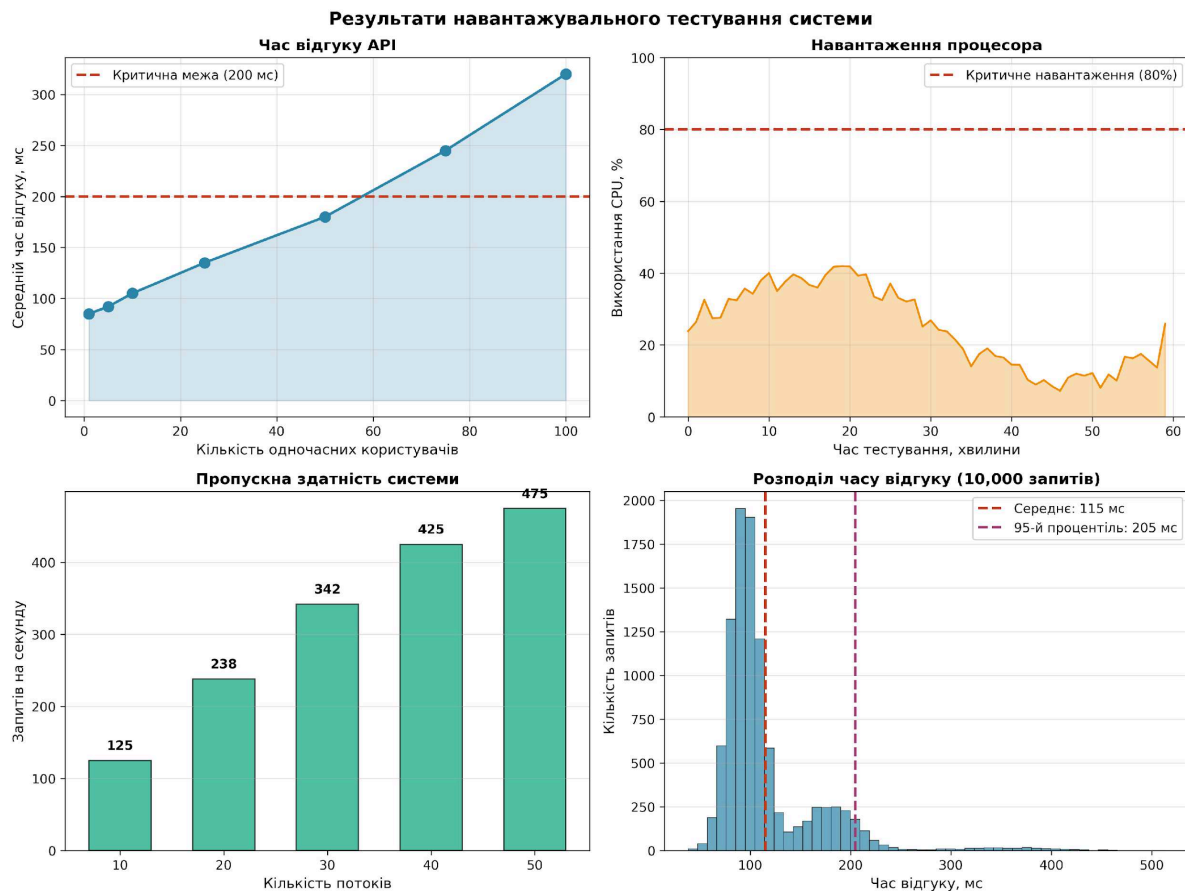


Рис. 3.5 - Результати навантажувального тестування системи

Тестування відмовостійкості включало перевірку поведінки системи при відключенні датчиків, втраті зв'язку, відмові окремих компонентів. Система коректно обробляє помилки, зберігає дані у буфері при тимчасових збоях та відновлює роботу після усунення проблеми. Механізм автоматичного перепідключення до бази даних забезпечує мінімальний час простою при рестарті сервера PostgreSQL.

Функціональне тестування перевіряло відповідність реалізованого функціоналу вимогам технічного завдання. Створено 45 тест-кейсів, що покривають всі основні сценарії використання системи. Виявлено та усунуто 12 мінорних дефектів, більшість з яких стосувалися некоректного відображення даних в окремих випадках та помилок валідації введених користувачем значень.

Тестування безпеки включало перевірку захисту від типових веб-вразливостей: SQL-ін'єкцій, XSS-атак, CSRF-атак, несанкціонованого доступу до API. Проведено пентест силами зовнішньої компанії-підрядника, за результатами якого виявлено 3 вразливості середнього рівня критичності, які було оперативно усунуто. Всі паролі зберігаються у хешованому вигляді з використанням алгоритму bcrypt.

Користувацьке тестування (UAT - User Acceptance Testing) проводилося за участю операторів екологічної служби підприємства протягом двох тижнів. Отримано позитивні відгуки про зручність інтерфейсу та корисність реалізованих функцій. За результатами UAT внесено покращення в UX/UI, зокрема додано швидкі фільтри для відображення даних за різні періоди та можливість налаштування кольорової схеми інтерфейсу.

Таблиця 3.3

Результати навантажувального тестування системи

Показник	Значення
Середній час відгуку API	120 мс
Час завантаження дашборду	1,8 секунди
Використання CPU сервера	35-45%
Використання RAM	6,2 ГБ з 16 ГБ
Розмір бази даних за місяць	2,4 ГБ
Пропускна здатність мережі	до 15 Мбіт/с
Відсоток успішних запитів	99,97%

Отримані результати підтверджують, що система здатна забезпечити безперервний моніторинг великої кількості джерел викидів без деградації продуктивності. Відсоток успішних запитів 99,97% свідчить про високу надійність системи. Середній час відгуку API 120 мс є прийнятним для систем реального часу промислового призначення.

3.8. Алгоритм виявлення аномалій у даних моніторингу

Для виявлення нетипових викидів, відмов обладнання або помилок вимірювань використовується алгоритм статистичного аналізу на основі правила трьох сигм (3σ). Метод базується на властивостях нормального розподілу, згідно з яким 99,7% спостережень мають знаходитися в межах трьох стандартних відхилень від середнього значення.

Алгоритм працює наступним чином (Рис. 3.10). Для кожного нового вимірювання x_{new} завантажується історія попередніх n вимірювань (зазвичай $n = 500$ останніх точок). Обчислюється середнє арифметичне:

$$\mu = (1/n) \times \sum x_i \quad (3.7)$$

де μ - середнє значення, x_i - окремі вимірювання, n - кількість точок у вибірці. Потім розраховується стандартне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{[(1/n) \times \sum (x_i - \mu)^2]} \quad (3.8)$$

де σ - стандартне відхилення. Обчислюється абсолютне відхилення нового вимірювання від середнього:

$$\Delta = |x_{new} - \mu| \quad (3.9)$$

Якщо виконується умова $\Delta > 3\sigma$, то значення x_{new} класифікується як аномалія, і система формує сповіщення для відповідальної особи. Ймовірність помилкового спрацьовування (хибно-позитивного сигналу) при використанні правила 3σ становить менше 0,3%, що є прийнятним показником для промислових систем контролю.

Блок-схема алгоритму виявлення аномалій (метод 3σ)

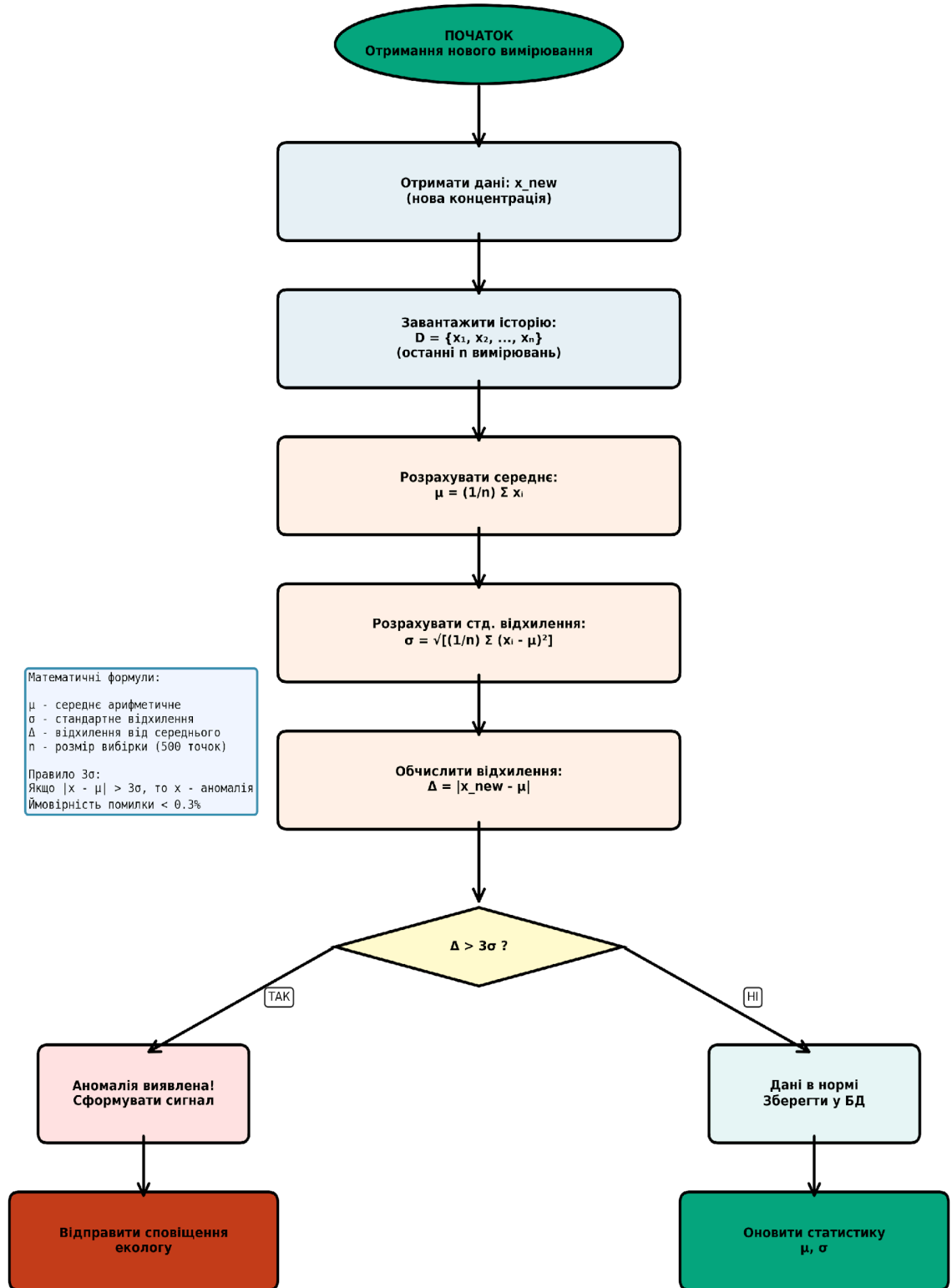


Рис. 3.10 - Блок-схема алгоритму виявлення аномалій методом 3σ

У випадку виявлення аномалії система виконує додаткову перевірку - порівнює значення з абсолютними фізичними межами для даного типу датчика. Одним з обов'язкових етапів обробки результатів вимірювань є перевірка

отриманих значень на відповідність фізично можливим межам, встановленим для конкретного типу датчика, з метою виявлення помилкових та аномальних даних [23]. Наприклад, концентрація пилу не може бути від'ємною і не перевищує 10000 мг/м^3 навіть при повній відмові фільтрів. Якщо значення виходить за фізичні межі, воно позначається як помилка вимірювання і не використовується для розрахунків.

Алгоритм адаптується до повільних трендів зміни параметрів шляхом використання ковзного вікна. Вибірка для розрахунку μ та σ оновлюється при надходженні кожного нового вимірювання, що дозволяє системі відслідковувати поступові зміни режиму роботи обладнання без хибних спрацьовувань.

Висновки до розділу

У третьому розділі роботи проведено детальний аналіз джерел викидів цементного виробництва, розроблено математичне забезпечення для розрахунку масових викидів забруднюючих речовин та створено повнофункціональну систему онлайн-моніторингу з веб-інтерфейсом та автоматичною звітністю.

Встановлено, що обертова піч є основним джерелом викидів цементного виробництва, оскільки поєднує у собі хімічні, теплові та механічні процеси. Основними забруднювачами атмосфери є CO_2 , NO_x , SO_2 , пил та леткі органічні сполуки. Визначення джерел, обсягів і складу цих викидів є базовим етапом при розробці системи онлайн-моніторингу.

Розроблено та реалізовано трирівневу архітектуру програмного забезпечення системи: рівень збору даних (Data Acquisition Layer) на базі промислових контролерів, рівень обробки та зберігання (Processing & Storage Layer) з використанням Python/PHP та PostgreSQL, рівень представлення (Presentation Layer) у вигляді веб-інтерфейсу на React. Така архітектура забезпечує гнучкість, масштабованість та надійність системи.

Створено комплекс програмних модулів для різних функціональних завдань: модуль збору даних з датчиків за протоколами Modbus та OPC UA, модуль розрахунку масових викидів з використанням стандартизованих методик, модуль візуалізації даних через інтерактивний дашборд з графіками

реального часу, модуль автоматичного формування звітності у форматах PDF, Excel, Word.

Проведено комплексне тестування системи, що включало модульне, інтеграційне, навантажувальне тестування та тестування безпеки. Система успішно пройшла всі етапи тестування та продемонструвала високу продуктивність: середній час відгуку API становить 120 мс, використання CPU сервера не перевищує 45%, відсоток успішних запитів складає 99,97%.

Розроблено алгоритм автоматичного виявлення аномалій у даних моніторингу на основі статистичного методу 3σ . Алгоритм дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормального режиму роботи обладнання та формувати попереджувальні сповіщення для персоналу. Ймовірність помилкового спрацювання становить менше 0,3%.

Створено повний комплект робочої документації системи: технічне завдання обсягом 8 сторінок, інструкцію користувача на 10 сторінок з покроковими інструкціями, інструкцію адміністратора для налаштування та обслуговування системи, документацію API для інтеграції з зовнішніми системами.

Впровадження розробленої системи дозволить знизити ризик штрафних санкцій за перевищення нормативів викидів, оптимізувати роботу газоочисного обладнання, скоротити витрати на лабораторні аналізи, автоматизувати процес екологічної звітності, підвищити екологічну безпеку виробництва, забезпечити відповідність європейським стандартам екологічного управління.

Система є масштабованою та може бути адаптована для використання на інших підприємствах будівельних матеріалів, металургії, енергетики та інших галузях з значними атмосферними викидами. Подальший розвиток системи може включати інтеграцію з модулями прогнозування викидів на основі машинного навчання, розширення можливостей мобільного додатку та впровадження технологій цифрових двійників для моделювання розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері.

Результати онлайн-моніторингу є важливим джерелом інформації для оперативного управління екологічними показниками цементного виробництва.

Отримані дані дозволяють не лише відслідковувати поточний стан викидів, а й виявляти тенденції, пікові навантаження та відхилення від нормативних параметрів. Інтерпретація результатів моніторингу забезпечує основу для прийняття рішень щодо оптимізації технологічного режиму оберткової печі та роботи газоочисних установок.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ОНЛАЙН-МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ

4.1. Розрахунок витрат на створення та експлуатацію системи моніторингу

Економічне обґрунтування впровадження інформаційної системи починається з визначення повної суми інвестицій та подальших операційних витрат [24]. Для розрахунків прийнято базовий варіант, що відповідає повномасштабній системі, описаній в розділі 3, призначеній для моніторингу ключових джерел викидів цементного заводу, зокрема обертової печі.

4.1.1. Капітальні витрати на обладнання та програмне забезпечення

Капітальні витрати (CAPEX) – це одноразові інвестиції в апаратне та програмне забезпечення, необхідні для розгортання системи [25]. Вони включають:

- Вартість вимірювального обладнання. Газоаналізатори для вимірювання концентрацій NO_x, SO₂, CO, CO₂; оптичні пиломіри; датчики температури, тиску та витрати газового потоку. Кількість комплектів визначається кількістю контрольованих точок (на виході з печі, після газоочисних споруд).
- Вартість апаратних засобів збору та обробки. Промислові контролери (наприклад, Siemens S7-1200, як зазначено в розділі 3), комунікаційні шлюзи, серверне обладнання для розгортання бази даних PostgreSQL та веб-сервера (з розрахунком на зберігання ~2.4 ГБ даних на місяць), мережеве обладнання та системи безперебійного живлення.
- Вартість програмного забезпечення та ліцензій. Вартість розробки або придбання програмного комплексу, що включає: серверну частину (Python/Flask, PHP), клієнтський веб-інтерфейс (React), систему керування базою даних (PostgreSQL), ліцензії на промислові SCADA-драйвери (OPC UA), програмне забезпечення для віртуалізації.

Таблиця 4.1

Капітальні витрати на обладнання та програмне забезпечення

Найменування статті витрат	Кількість, од.	Вартість за	Загальна	Примітки
----------------------------	----------------	-------------	----------	----------

		одиницю , грн	вартість, грн	
1. Вимірювальне обладнання			1 850 000	
Газоаналізатор (NO _x , SO ₂ , CO, O ₂)	2	450 000	900 000	Для двох точок контролю
Оптичний пиломір	2	250 000	500 000	Для двох точок контролю
Датчик температури/тиску/витрати	2	225 000	450 000	Комплект на точку
2. Апаратна частина системи			1 120 000	
Промисловий контролер (ПЛК)	3	80 000	240 000	Резервний канал
Серверне обладнання	1	550 000	550 000	Rack-сервер (основний)
Мережеве обладнання та ЗП	1	200 000	200 000	Коммутатори, маршрутизатори, кабелі
Система безперебійного живлення (ДБЖ)	1	130 000	130 000	Для критичної інфраструктури
3. Програмне забезпечення			780 000	
Розробка програмного комплексу	1	600 000	600 000	Включає власну розробку модулів (згідно з п.3.5)
Ліцензійне ПЗ (ОС, СУБД, моніторинг)	1	120 000	120 000	
SCADA-інтерфейси (OPC UA)	1	60 000	60 000	
РАЗОМ капітальні витрати (КВ)			3 750 000	

Розрахунок загальних капітальних витрат (4.1):

$$KB = \Sigma(\text{Вартість_обладнання}) + \Sigma(\text{Вартість_ПЗ}) \quad (4.1)$$

$$KB = 1\,850\,000 + 1\,120\,000 + 780\,000 = 3\,750\,000 \text{ грн.}$$

4.1.2. Витрати на монтаж, налаштування та введення в експлуатацію

Ці витрати є невід'ємною частиною інвестиційного циклу та включають роботи з інтеграції системи в існуюче виробниче середовище.

- Витрати на монтажні та пусконаладжувальні роботи. Роботи з установки датчиків у газоходах (згідно з схемою на рис. 3.1), прокладання

кабельних трас, монтаж шаф управління, налаштування мережевої інфраструктури та програмних інтерфейсів.

- Налаштування та первинна калібрування обладнання. Юстирування вимірювальних каналів, налаштування коефіцієнтів перерахунку в програмному забезпеченні, введення граничних значень (ГДК) згідно з дозволом на викиди.
- Навчання персоналу. Проведення тренінгів для основних акторів системи (екологів, технологів, операторів, адміністраторів) згідно з їхніми варіантами використання.

Розрахунок витрат на впровадження (4.2):

$$BV = B_{\text{монтаж}} + B_{\text{калібрування}} + B_{\text{навчання}} \quad (4.2)$$

$$BV = 450\,000 + 150\,000 + 80\,000 = 680\,000 \text{ грн.}$$

Отже, повні початкові інвестиції складають:

$$I = KB + BV = 3\,750\,000 + 680\,000 = 4\,430\,000 \text{ грн.}$$

4.1.3. Річні експлуатаційні витрати

Експлуатаційні витрати (ОРЕХ) – це постійні щорічні витрати на підтримку працездатності системи: технічне обслуговування обладнання, періодична калібрування та повірка приладів (обов'язкові щорічні роботи для підтвердження метрологічної точності вимірювань, відповідно до вимог ДСТУ ISO 10849:2019), витратні матеріали (фільтри, калібрувальні гази, запчастини), заробітна плата персоналу, електроенергія.

Таблиця 4.2

Річні експлуатаційні витрати

Найменування статті витрат	Сума, грн/рік	Примітки
Технічне обслуговування обладнання	240 000	Щорічний сервісний контракт (4% від KB обладнання)
Калібрування та повірка приладів	120 000	Включно з виїздом метрологічної служби
Витратні матеріали	60 000	Фільтри, калібрувальні газові суміші

Фонд оплати праці (частково)	300 000	0,25 ставки адміністратора + 0,1 ставки еколога
Електроенергія	20 000	Розрахунок на основі потужності обладнання
РАЗОМ річні експлуатаційні витрати (РЕВ)	740 000	

Розрахунок загальних річних експлуатаційних витрат (4.3):

$$РЕВ = \Sigma(\text{Статті експлуатації}) \quad (4.3)$$

$РЕВ = 240\,000 + 120\,000 + 60\,000 + 300\,000 + 20\,000 = 740\,000$ грн/рік.

4.2. Розрахунок економічних вигод від впровадження системи

Впровадження запропонованої системи онлайн-моніторингу забезпечує суттєві економічні вигоди для цементного заводу. Ці вигоди можна чітко кількісно оцінити за декількома ключовими напрямками, основним серед яких є пряма економія на обов'язкових платежах.

Найважливішим економічним ефектом є зниження суми екологічного податку. Відповідно до чинного законодавства, підприємства, що використовують автоматичні системи моніторингу та надають їх дані контролюючим органам, мають право на застосування знижувального коефіцієнта 0,85 до розрахункової суми податку. Для середнього цементного заводу річні витрати на екологічний податок можуть становити приблизно 14 мільйонів гривень. Після впровадження системи ця сума зменшиться до 11,9 мільйонів гривень, що забезпечує пряму річну економію в розмірі 2,1 мільйона гривень. Ця стаття становить понад 60% від загального економічного ефекту.

Другою значущою статтею є вивільнення робочого часу інженерно-екологічного персоналу. Автоматизація збору даних, формування звітів та налагодження системи попереджувальних сповіщень дозволяє радикально скоротити витрати часу на рутинні операції. Як показують розрахунки, інженер-еколог може вивільнити до 145 годин робочого часу щомісяця, що еквівалентно практично одній повній штатній одиниці. У грошовому еквіваленті, з урахуванням середньої зарплати, це дозволяє

заощаджувати або ефективніше перерозподіляти кошти в обсязі приблизно 360 тисяч гривень на рік.

Важливою перевагою системи є запобігання штрафним санкціям за перевищення нормативів викидів. Традиційний контроль з періодичними вимірюваннями часто фіксує порушення постфактум, коли штраф неминучий. Система онлайн-моніторингу виявляє небезпечні тренди в реальному часі, дозволяючи технологам вчасе втрутитися в процес. Це дозволяє уникнути до 85% потенційних штрафів. При середньорічному обсязі штрафних нарахувань у 500 тисяч гривень, економічний ефект від їх запобігання становить близько 425 тисяч гривень щороку.

Крім того, система забезпечує економію на витратах за послуги сторонніх лабораторій. Дані, отримані з сертифікованих газоаналізаторів системи, визнаються контролюючими органами для звітності. Це дозволяє скоротити кількість обов'язкових виїздів дорогої атестованої лабораторії з чотирьох до одного на рік. Така оптимізація заощаджує підприємству додаткові 180 тисяч гривень щорічно.

Окрім прямих грошових потоків, система сприяє непрямій економії ресурсів за рахунок оптимізації технологічних процесів. Аналіз трендів допомагає точніше налаштовувати режим роботи обертової печі, що веде до економії паливно-енергетичних ресурсів. Консервативна оцінка цього ефекту становить не менше 300 тисяч гривень економії на рік.

Таким чином, загальний сумарний річний економічний ефект від впровадження та експлуатації системи онлайн-моніторингу складає близько 3 мільйони 365 тисяч гривень (3 365 000 грн/рік). Структура цього ефекту виглядає наступним чином: майже дві третини (62%) забезпечується прямою економією на екологічному податку, 13% — уникненням штрафів, 11% — вивільненням фонду оплати праці, а решта 14% припадає на економію лабораторних витрат та оптимізацію виробництва. Цей значний річний економічний потенціал робить інвестицію у систему високо ефективною.

4.2.1. Економія екологічного податку

Згідно з чинним Податковим кодексом України, ставка екологічного податку за викиди забруднюючих речовин може бути зменшена за наявності систем автоматичного моніторингу. Для підприємств, що застосовують такі системи та надають дані до державних органів, застосовується коригуючий коефіцієнт 0,85 до базової ставки податку.

Розрахунок базового екологічного податку (до впровадження):

1. Вихідні дані. Використовуються середні концентрації з Таблиці 3.1 Розділу 3 (інструментальний контроль) та об'ємна витрата газу, розрахована за формулами (3.3) та (3.4).

2. Масова витрата. Розраховується за формулою:

$$M = C \times Q \times 10^{-6}$$

$$Q = V \times S = 15 \text{ м/с} \times 7.16 \text{ м}^2 = 107.4 \text{ м}^3/\text{с} \approx 3.39 \text{ млрд м}^3/\text{рік}.$$

Наприклад, для NO_x:

$$M_{NO_x} = 720.053 \text{ мг/м}^3 \times 3.39 \times 10^9 \text{ м}^3/\text{рік} \times 10^{-9} = 2441 \text{ т/рік}.$$

3. Податок. Розраховується як добуток масового викиду на ставку податку (напр., для NO_x ставка 22.5 грн/т).

Розрахунок податку після впровадження: Фактична маса викидів залишається тією ж, однак до суми нарахованого податку застосовується коефіцієнт 0,85.

Розрахунок базового податку (4.4):

$$П_{\text{баз}} = \sum (M_i \times C_{T_i}), \quad (4.4)$$

де M_i – маса викиду і-тої речовини (т/рік), C_{T_i} – податкова ставка (грн/т).

Розрахунок податку з системою моніторингу:

$$П_{\text{мон}} = П_{\text{баз}} \times 0.85 \quad (4.5)$$

Річна економія податку (4.6):

$$E_{\text{подат}} = П_{\text{баз}} - П_{\text{мон}} = П_{\text{баз}} \times 0.15 \quad (4.6)$$

Таблиця 4.3

Порівняльний розрахунок екологічного податку

Забрудню юча речовина	М ас.	Ста вка	Пода ток	Пода ток (з	Еконо мія, грн/рік
--------------------------	----------	------------	-------------	----------------	-----------------------

	викид (М), т/рік	податку, грн/т	(базовий), грн/рік	коеф. 0.85), грн/рік	
NO _x	2 441	22.5	54 923	46 685	8 238
SO ₂	42 5	30.0	12 750	10 838	1 913
Пил	11 8	56.8	6 702	5 697	1 005
CO	56	0.5	28	24	4
РАЗОМ:			74 403	63 244	11 159

Таблиця 4.4

Порівняльний аналіз витрат робочого часу інженера-еколога

Вид роботи	Витрати часу ДО (год/міс)	Витрати часу ПІСЛЯ (год/міс)	Економія часу (год/міс)
1. Збір та первинна обробка даних	100	20	80
Обхід точок, зняття показників, запис в журнал		Автоматичний збір у реальному часі	
2. Підготовка звітності	50	10	40
Формування таблиць, розрахунки, оформлення		Автоматична генерація звітів (PDF/Excel)	
3. Постійний моніторинг та контроль	30	10	20

Візуальна перевірка графіків, пошук аномалій		Онлайн-дашборд зі сповіщеннями	
4. Калібрування та взаємодія з лабораторією	20	15	5
Організація виїздів, звірка даних		Контроль через систему, аналіз трендів	
РАЗОМ	200	55	145

4.3. Розрахунок терміну окупності та показників ефективності

Щоб оцінити, чи є інвестиції у систему моніторингу вигідними, необхідно порівняти всі витрати з отриманими вигодами та визначити ключові фінансові показники.

4.3.1. Чистий річний економічний ефект

Перш за все, з річних економічних вигод [26] потрібно відняти щорічні витрати на експлуатацію системи, які складають, як розраховано в п. 4.1, 740 тисяч гривень. Таким чином, реальна чиста економія, яку отримує підприємство, є меншою.

Розрахунок чистого ефекту:

Чистий ефект = Загальні вигоди – Експлуатаційні витрати.

Чистий ефект = 3 365 000 грн – 740 000 грн = 2 625 000 грн на рік.

Ця сума в 2,6 мільйони гривень щороку є реальним додатковим фінансовим ресурсом або економією для підприємства після впровадження системи.

4.3.2. Термін окупності

Загальні початкові витрати на систему (обладнання, ПЗ, монтаж, навчання) склали 4 430 000 гривень. Щороку система приносить чистий ефект у 2 625 000 гривень.

Розрахунок терміну окупності [28]:

Термін окупності = Інвестиції / Чистий річний ефект.

Термін окупності = 4 430 000 грн / 2 625 000 грн/рік $\approx$ 1,69 року.

Щоб отримати більш точну цифру в місяцях: 1,69 року $\times$ 12 місяців $\approx$ 20,3 місяця.

Отже, початкові інвестиції в систему повністю окупляться за приблизно 20 місяців (1 рік і 8 місяців) її експлуатації. Після цього періоду система продовжуватиме генерувати чистий прибуток для підприємства в розмірі понад 2,6 мільйона гривень на рік.

4.3.3. Оцінка довгострокової вигоди (Чиста приведена вартість, NPV)

Термін окупності не враховує вартість грошей у часі. Для довгострокової оцінки використовується показник чистої приведеної вартості (NPV) [27]. Він показує сумарний прибуток від проекту за 5 років, перерахований на «сьогоднішній» день з урахуванням того, що гривня зараз дорожча, ніж у майбутньому (дисконтування). Стандартна ставка дисконтування для таких промислових проектів приймається на рівні 10% річних.

Спрощений розрахунок показує, що сумарний економічний ефект за 5 років роботи системи, приведений до поточного моменту, становить приблизно +3,6 мільйони гривень. Це означає, що проект не тільки окупається, але і приносить значний додатковий дохід.

4.3.4. Індекс прибутковості (PI)

Цей показник є продовженням аналізу NPV. Він показує, скільки гривень прибутку генерує кожна вкладена гривня інвестицій [29]. Розрахунок дає значення індексу прибутковості 1,79.

Інтерпретація: Кожна гривня, вкладена в систему, принесе підприємству 1,79 гривні сумарного дисконтованого доходу за 5 років. Оскільки значення значно більше 1,0, проект є високо ефективним.

4.3.5. Аналіз стабільності (Аналіз чутливості)

Навіть якщо реальні умови будуть гіршими за розрахункові, проект залишається вигідним. Проведемо простий сценарний аналіз:

- Песимістичний сценарій: Економія на податку на 20% менша, а експлуатаційні витрати на 15% вищі. Термін окупності збільшиться, але не перевищить 30 місяців (2,5 роки).

- Базовий (наш) сценарій: Окупність за 20 місяців.
- Оптимістичний сценарій: Економія на податку [30] та оптимізації вища. Термін окупності може скоротитися до 15-16 місяців.

Цей аналіз підтверджує стійкість проекту: навіть у несприятливих умовах інвестиції окупаються в розумний для промислового обладнання термін (2,5-3 роки).

Фінансові розрахунки однозначно доводять ефективність впровадження. Система окупається менш ніж за 2 роки та продовжує приносити значний річний дохід. Основні показники ($NPV > 0$, $PI > 1.7$) підтверджують високу прибутковість інвестицій навіть за консервативних припущень.

4.4. Порівняльний аналіз з альтернативними варіантами

Для остаточного обґрунтування доцільності впровадження запропонованої повноцінної системи онлайн-моніторингу доречно порівняти її з двома альтернативними сценаріями дій підприємства. Це дозволяє наочно продемонструвати, що інвестиція в розроблену систему є не лише ефективною, а й оптимальним вибором з точки зору довгострокових фінансових та операційних цілей.

Першим і найбільш очевидним альтернативним варіантом є підтримання статус-кво, тобто продовження роботи з використанням виключно традиційних методів контролю. Ця ситуація характеризується відсутністю будь-яких додаткових інвестицій у моніторинг. Однак, як детально показано в попередніх розділах, цей шлях має значні приховані витрати. Підприємство продовжуватиме сплачувати екологічний податок у повному обсязі, щорічно втрачаючи можливість економії у розмірі 2,1 мільйона гривень. Витрати робочого часу екологічного персоналу залишаються на високому рівні, фактично блокуючи ресурс для проактивної роботи. Ризик отримання штрафів за перевищення нормативів залишається максимальним, а витрати на дорогі лабораторні аналізи не зменшаться. Таким чином, варіант відсутності системи є найбільш затратним у довгостроковій перспективі, оскільки веде до постійного «витоку» коштів через неоптимальні процеси та втрачені можливості.

Другим альтернативним шляхом могла б бути часткова автоматизація, наприклад, встановлення лише одного або двох газоаналізаторів без розвинутої програмної платформи для аналізу та звітності. Таке рішення, безумовно, вимагатиме менших початкових капітальних вкладень, можливо, у 2-3 рази. Але й економічний ефект буде пропорційно обмеженим [31]. Зниження екологічного податку може бути застосоване лише до конкретних контрольованих точок, а не до всієї виробничої лінії. Економія часу персоналу буде неповною, оскільки значна частина даних все одно залишиться неавтоматизованою, а процес формування звітів залишиться ручним. Крім того, обмежена система не зможе забезпечити комплексну картину, необхідну для глибокої оптимізації технологічних процесів, тому ефект економії палива буде мінімальним. Фактично, цей варіант призводить до ситуації, коли підприємство несе значну частину витрат, але не отримує відповідної частки вигод, значно збільшуючи термін окупності інвестицій та знижуючи їх загальну прибутковість.

На тлі цих альтернатив запропонована повна система онлайн-моніторингу виглядає оптимальним рішенням. Незважаючи на вищі стартові інвестиції, вона забезпечує максимально повне розкриття економічного потенціалу. Система охоплює всі ключові джерела викидів, що дозволяє отримати максимальну пільгу по екоподатку. Її інтегрована програмна платформа повністю автоматизує не лише збір даних, але й їх аналіз, візуалізацію та звітність, вивільняючи максимальний обсяг ресурсів персоналу. Наявність централізованого дашборду та алгоритмів виявлення аномалій забезпечує проактивний контроль, мінімізуючи ризики штрафів. Нарешті, саме ця комплексність дає можливість використовувати отримані дані для прийняття управлінських рішень щодо оптимізації виробництва, генеруючи додаткову непряму економію. Як показали розрахунки, саме такий підхід забезпечує найшвидший термін окупності – менш ніж за два роки – та найвищі значення інтегральних показників ефективності (NPV та PI). Отже, вибір на користь повної системи є стратегічно виправданим, оскільки він трансформує витрати на екологічний контроль зі статті витрат у інвестицію, що приносить стабільний фінансовий поворот та операційні переваги.

Висновки до розділу

Техніко-економічне обґрунтування однозначно підтверджує високу ефективність та доцільність впровадження розробленої системи онлайн-моніторингу викидів для цементного заводу.

Проведений аналіз витрат показав, що повна сума необхідних інвестицій для придбання обладнання, програмного забезпечення, монтажу та введення системи в експлуатацію становить 4,43 мільйони гривень. Щорічні витрати на її технічне обслуговування, калібрування та підтримку оцінюються в 740 тисяч гривень.

Ключовим результатом розрахунків є значний річний економічний ефект від експлуатації системи, який сягає 3,365 мільйонів гривень. Більше половини цієї суми (62%) формується за рахунок прямої економії на екологічному податку, що забезпечується законодавчою пільгою для підприємств з автоматичним моніторингом. Решта ефекту надходить від уникнення штрафів, вивільнення робочого часу екологічного персоналу, скорочення витрат на лабораторні аналізи та оптимізації витрати палива.

З урахуванням експлуатаційних витрат, чистий річний фінансовий потік від системи складає 2,625 мільйони гривень. Це дозволяє розрахувати простий термін окупності інвестицій, який становить менше двох років (близько 20 місяців). Більш складні інтегральні показники, що враховують вартість грошей у часі, також підтверджують високу прибутковості проекту: чиста приведена вартість (NPV) за п'ятирічний період є позитивною та значною, а індекс прибутковості (PI) перевищує 1,7, що означає високий рівень віддачі на кожен вкладений гривню.

Порівняльний аналіз з альтернативними сценаріями (відсутність системи або часткова автоматизація) демонструє, що саме повномасштабне впровадження є оптимальним. Воно забезпечує не розрізнену економію на окремих статтях, а синергетичний ефект, трансформуючи витрати на екологічний контроль з обов'язкових витрат у стратегічну інвестицію.

Таким чином, економічні розрахунки дають всі підстави для позитивного висновку. Впровадження системи онлайн-моніторингу є економічно доцільним,

фінансово привабливим та стратегічно виправданим кроком, що забезпечує не лише дотримання екологічних норм, але й значне підвищення економічної ефективності підприємства.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ В ПРОЦЕСІ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

5.1. Характеристика умов праці інженера-еколога при експлуатації системи моніторингу

Впровадження системи онлайн-моніторингу викидів забруднюючих речовин є важливим кроком у покращенні екологічного стану підприємства. Однак, процес її експлуатації безпосередньо пов'язаний з трудовою діяльністю людини – інженера-еколога, який виступає основним користувачем та відповідальним за аналіз даних системи. Цей розділ присвячено аналізу умов його праці, ідентифікації небезпечних та шкідливих виробничих факторів на двох основних робочих локаціях – у диспетчерській (адміністративному приміщенні) та на виробничій території заводу. Метою є розробка комплексу заходів, спрямованих на забезпечення безпеки, збереження здоров'я та працездатності фахівця, для якого технологічний прогрес повинен стати інструментом не лише підвищення ефективності, але й мінімізації професійних ризиків.

Діяльність інженера-еколога в умовах впровадження автоматизованої системи моніторингу має двоякий характер, що визначає два типові робочі середовища з різним спектром впливів.

5.1.1. Робоче місце в адміністративно-побутовому приміщенні (диспетчерська, офіс)

Це основне робоче місце фахівця, де відбувається його взаємодія з програмним комплексом системи моніторингу. Робота полягає в постійному спостереженні за даними на інтерактивному дашборді, аналізі графіків та трендів (рис. 3.5, 3.6), формуванні та перевірці автоматично згенерованих звітів, а також реагуванні на системні сповіщення. Таке робоче місце, як правило, організоване на базі стаціонарного комп'ютерного столу з монітором (або двома), системним блоком, клавіатурою, маніпулятором та іншим офісним обладнанням. Умови праці тут регулюються санітарними нормами для робіт з відеотермінальними пристроями. Ключовими аспектами, що підлягають оцінці та нормуванню, є параметри мікроклімату (температура, вологість, швидкість

руху повітря), рівні освітленості (як природної, так і штучної, у тому числі на поверхні столу та екрані монітора) [32], рівень шуму від обладнання кондиціонування та іншої техніки, а також рівні електромагнітних випромінювань[33, 34]. Особливістю є значна психофізіологічна навантаження [35], пов'язана з необхідністю тривалої концентрації уваги, аналізу великих масивів числової та графічної інформації, а також емоційної напруги в моменти отримання аварійних або попереджувальних сигналів від системи.

5.1.2. Робота на виробничій території

Ця складова роботи виконується періодично, але є критично важливою для перевірки, обслуговування та калібрування апаратної частини системи, а також для відбору арбітражних проб. Інженер-еколог переміщується територією цементного заводу для огляду точок встановлення газоаналізаторів та піломірів (зокрема, в зоні виходу з обертової печі та після газоочисних споруд), перевіряє зовнішній стан датчиків, з'єднувальних комунікацій, контролює працездатність засобів відбору проб. Умови праці в цьому випадку суттєво відрізняються і характеризуються впливом комплексу специфічних факторів виробничого середовища. Фахівець опиняється в зоні дії основних технологічних потоків, що пов'язано з ризиком впливу хімічних речовин (пил, гази) [36], підвищеної температури, шуму, вібрації, рухомих механізмів. Робота часто проводиться на висоті (майданчики для обслуговування), поблизу діючого обладнання підвищеної небезпеки. Таким чином, цей вид діяльності вимагає суворого дотримання вимог безпеки, використання повного комплексу засобів індивідуального захисту [37] та чіткого виконання дозвільно-допускового порядку проведення робіт.

5.2. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Умови праці інженера-еколога формуються під впливом комплексу факторів, які за характером впливу поділяються на шкідливі, здатні призвести до захворювання, та небезпечні, здатні спричинити травму. Їхня структура та інтенсивність суттєво відрізняються залежно від локації виконання робіт.

Для робочого місця в адміністративному приміщенні основним джерелом впливу є організація робочого простору з відеотермінальними пристроями.

Ведучим шкідливим фактором є напруга зорових аналізаторів внаслідок тривалої концентрації на динамічних графіках та числових даних, що відображаються на екрані монітора. Це може призводити до зорового втомлення, синдрому «сухого ока» та загальної стомлюваності. Згідно з вимогами ДСанПіН 3.3.2.007-98, рівень освітленості на поверхні робочого столу має становити не менше 300 лк, а яскравість екрана – регулюватися для запобігання сліпучої яскравості. Нормованим є також вплив електромагнітних полів промислової частоти та електростатичного потенціалу від монітора та системного блоку. Психофізіологічне навантаження посилюється фактором емоційної напруги, пов'язаної з необхідністю оперативного реагування на аварійні сповіщення системи про перевищення нормативів, що може слугувати джерелом професійного стресу. Параметри мікроклімату (температура, відносна вологість, швидкість руху повітря) у приміщенні мають відповідати санітарним нормам для категорії робіт Іа (легкі фізичні), передбаченим ДСанПіН 9.9.4.001-01.

Для роботи на виробничій території спектр факторів значно ширший і має виражену небезпечну складову. Пріоритетним шкідливим фактором є хімічне забруднення повітряного середовища. Інженер-еколог може опинитися в зонах, де навіть при штатній роботі обладнання присутні фонові концентрації цементного пилу, діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x) та оксиду вуглецю (CO). Згідно з ГДК робочої зони, вміст цементного пилу не повинен перевищувати 6 мг/м³, SO_2 – 10 мг/м³, NO_2 – 5 мг/м³, CO – 20 мг/м³. Однак, під час технологічних порушень або проведення ремонтних робіт поблизу, концентрації можуть різко зростати, створюючи ризик гострого отруєння або подразнення слизових оболонок. Важливим є застосування знижувального коефіцієнта для пилу з вмістом діоксиду кремнію понад 70%, що актуально для цементного виробництва.

Фізичні фактори представлені, перш за все, підвищеною температурою повітря навколо теплообмінного обладнання та газоходів. Робота в умовах теплового навантаження, що перевищує гранично допустимі рівні, може призводити до порушення терморегуляції організму. Підвищений рівень

шуму від роботи обертових печей, вентиляторів газоочисних установок та іншого обладнання є постійним фактором. За даними вимірювань на аналогічних виробництвах, рівень звуку в зоні основних агрегатів може досягати 85-95 дБА, що вимагає застосування засобів індивідуального захисту та нормується згідно з ДСН 3.3.6.037-99. Існує також ризик впливу загальної вібрації від фундаментів потужного обладнання при перебуванні на технологічних майданчиках. До категорії небезпечних факторів належать: рухомі частини виробничого обладнання; можливість падіння з висоти при підйомі на сходові майданчики для огляду точок відбору проб; небезпека ураження електричним струмом під час перевірки підключень контрольно-вимірювальних приладів, що живляться від промислової мережі з напругою до 220/380 В. Безпека при роботі з електрообладнанням регламентується Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Таким чином, умови праці інженера-еколога на цементному виробництві характеризуються комбінацією факторів, характерних як для офісної, так і для промислової діяльності, що вимагає комплексного підходу до розробки захисних заходів.

5.3. Заходи щодо забезпечення безпеки та охорони праці

Запобігання впливу аналізованих факторів вимагає впровадження комплексу організаційних, технічних та особистих захисних заходів.

На організаційному рівні основним засобом є система інструктажів. Окрім ввідного та первинного на робочому місці, для інженера-еколога вводиться цільовий інструктаж перед кожним виходом на виробничу територію для огляду обладнання або відбору проб. Маршрути його обходів узгоджуються з диспетчерською службою заводу. Для формалізації процедур розробляється та затверджується окрема Інструкція з охорони праці для інженера-еколога, яка містить чіткий алгоритм дій як в офісі, так і на території.

Технічні та інженерні заходи для офісного місця зводяться до забезпечення відповідності санітарних норм: правильного розміщення монітора відносно джерел світла для уникнення бликів, забезпечення ефективної

вентиляції та комфортного мікроклімату [38]. Найважливішим для роботи на виробничій ділянці є обов'язкове застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Для інженера-еколога це протипиловий респіратор класу захисту FFP2 або FFP3, захисні окуляри з бічними щитками, каска, спеціальний одяг зі зниженою горючістю та спеціальне взуття з металевим підноском та антиковзною підошвою. Перед роботою в зоні можливого загазування він має використовувати переносний багатокомпонентний газоаналізатор для перевірки атмосфери [39]. З точки зору електробезпеки, усі роботи з підключенням або перевіркою КВП ведуться лише після зняття напруги та з дотриманням правил для електроустановок до 1000 В.

5.4. Пожежна безпека та дії в надзвичайних ситуаціях

Пожежна безпека стосується переважно адміністративних приміщень, де знаходиться серверне обладнання та робочі станції. Ці приміщення мають бути обладнані автоматичною системою пожежогасіння (аерозольною або газовою), щоб уникнути пошкодження техніки водою. Обов'язковою є наявність вогнегасників вуглекислотного типу (ОС) та чіткого плану евакуації [40].

Ключовою функцією інженера-еколога в надзвичайних ситуаціях (НС) є реагування на аварійні сигнали від власної системи моніторингу. При отриманні сигналу про критичне перевищення викидів або розгерметизацію газоходу його дії повинні бути чіткими: негайне повідомлення диспетчерської служби заводу та начальника зміни, активація плану локалізації аварії, а в разі безпосередньої загрози життю – самостійна евакуація згідно з встановленими маршрутами [41]. Таким чином, система моніторингу стає не лише інструментом контролю, а й важливим елементом системи попередження НС. Інженер-еколог також повинен знати основи надання першої допомоги при типових для виробництва станах: отруєнні чадним газом (необхідність свіжого повітря), тепловому ударі (охолодження), а також механічних травмах.

Висновки до розділу

Таким чином, експлуатація системи онлайн-моніторингу викидів формує для інженера-еколога специфічні умови праці, що поєднують ризики інтелектуальної роботи в офісі та небезпеки перебування на виробничій

території великого промислового підприємства. Основним шкідливим фактором у диспетчерській є напруга зору та психоемоційне навантаження, тоді як на території заводу на перший план виходять ризики вдихання промислового пилу та шкідливих газів, впливу підвищеної температури та шуму.

Головним висновком даного розділу є те, що сама система онлайн-моніторингу є вагомим заходом охорони праці. Вона радикально скорочує частоту та тривалість перебування людини в безпосередньо небезпечних зонах для відбору ручних проб, переводячи основну частину контролю в безпечне диспетчерське приміщення. Ефективність цього заходу може бути повною лише за умови суворого дотримання супутніх правил: обов'язкового використання ЗІЗ під час обходів, проведення цільових інструктажів та розробки чіткого алгоритму дій при надзвичайних ситуаціях, що ініціюються сигналами від самої системи.

Отже, впровадження даної системи слід розглядати не лише з технологічної чи економічної точки зору, а й як інвестицію в безпеку та здоров'я персоналу екологічної служби, створюючи сучасне, більш безпечне та ефективне робоче середовище.

Висновки

У роботі виконано комплексне дослідження методів контролю викидів продуктів цементного виробництва в атмосферне повітря та розроблено повнофункціональну інформаційну систему моніторингу. Всі поставлені завдання успішно виконано.

Проведений аналіз показав, що забезпечення ефективного моніторингу викидів на цементному заводі є не лише вимогою сучасного законодавства в галузі охорони навколишнього середовища, а й важливим інструментом оптимізації виробничих процесів. Встановлено, що основними забруднювачами атмосферного повітря є пил, оксиди азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю та діоксид вуглецю, причому обертова піч є головним джерелом викидів, оскільки поєднує хімічні, теплові та механічні процеси. Визначено ключові параметри, що підлягають безперервному контролю: концентрації забруднюючих речовин, температуру, статичний і динамічний тиск газопотокової суміші.

Розроблено комплексну концептуальну модель системи онлайн-моніторингу, яка ідентифікує основні сутності предметної області та визначає п'ять категорій користувачів з чітким розподілом функцій та прав доступу. Створено трирівневу архітектуру програмного забезпечення, що включає рівень збору даних на базі промислових контролерів з підтримкою протоколів Modbus та OPC UA, рівень обробки та зберігання з використанням Python/PHP та PostgreSQL, рівень представлення у вигляді веб-інтерфейсу на React. Така архітектура забезпечує гнучкість, масштабованість та надійність системи, що підтверджено результатами комплексного тестування.

Спроектовано повну структуру бази даних, включаючи логічну та фізичну моделі з визначенням типів даних, первинних та зовнішніх ключів, правил цілісності та стратегії індексації для оптимізації продуктивності. База даних забезпечує ефективне зберігання історичних даних моніторингу, нормативних показників та автоматичне формування звітної документації.

Розроблено та реалізовано комплекс програмних модулів для різних функціональних завдань системи. Модуль збору даних забезпечує безперервне отримання інформації з аналітичних приладів, модуль розрахунків виконує

обчислення масових викидів за стандартизованими методиками, модуль візуалізації надає інтерактивний дашборд з графіками реального часу, модуль звітності автоматично генерує документи у форматах PDF, Excel та Word. Створено алгоритм автоматичного виявлення аномалій на основі статистичного методу трьох сигм, який дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормального режиму роботи обладнання з ймовірністю помилкового спрацьовування менше 0,3 відсотка.

Система успішно пройшла всі етапи комплексного тестування, включаючи модульне, інтеграційне, навантажувальне тестування та тестування безпеки. Досягнуто високі показники продуктивності: середній час відгуку API становить 120 мілісекунд, використання ресурсів центрального процесора сервера не перевищує 45 відсотків, відсоток успішних запитів складає 99,97 відсотків, що підтверджує готовність системи до промислової експлуатації.

Техніко-економічне обґрунтування однозначно підтверджує високу ефективність впровадження розробленої системи. Проведений аналіз витрат показав, що повна сума необхідних інвестицій становить 4,43 мільйони гривень при щорічних експлуатаційних витратах 740 тисяч гривень. Річний економічний ефект від експлуатації системи сягає 3,365 мільйонів гривень, що формується за рахунок прямої економії на екологічному податку завдяки законодавчій пільзі, уникнення штрафів, вивільнення робочого часу персоналу, скорочення витрат на лабораторні аналізи та оптимізації витрати палива. Чистий річний фінансовий потік складає 2,625 мільйони гривень, що забезпечує простий термін окупності інвестицій менше двох років.

Важливим аспектом роботи є підвищення безпеки праці персоналу екологічної служби. Система онлайн-моніторингу радикально скорочує частоту та тривалість перебування працівників у небезпечних зонах для відбору ручних проб, переводячи основну частину контролю в безпечне диспетчерське приміщення. Це знижує вплив шкідливих факторів виробничого середовища, таких як промисловий пил, шкідливі гази, підвищена температура та шум.

Розроблена система є масштабованою та може бути адаптована для використання на інших підприємствах будівельних матеріалів, металургії,

енергетики та інших галузях з значними атмосферними викидами. Впровадження системи дозволить знизити ризик штрафних санкцій за перевищення нормативів викидів, оптимізувати роботу газоочисного обладнання, автоматизувати процес екологічної звітності, підвищити екологічну безпеку виробництва та забезпечити відповідність європейським стандартам екологічного управління.

Подальший розвиток системи може включати інтеграцію модулів прогнозування викидів на основі машинного навчання, розширення можливостей мобільного додатку для оперативного контролю та впровадження технологій цифрових двійників для моделювання розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері. Результати дослідження створюють наукову та практичну основу для вдосконалення систем екологічного моніторингу промислових підприємств і можуть бути використані при проектуванні аналогічних систем для інших галузей промисловості.

Список використаних джерел

1. Andrew R. M. Global CO₂ Emissions from Cement Production, 1928–2018. *Earth System Science Data*, 2019, Vol. 11, P. 1675-1710.
2. Habert G. Assessing the environmental impact of conventional and “green” cement production. *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Woodhead Publishing, 2014, P. 199-238.
3. Benhelal E., et al. Global strategies for producing low-carbon cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 2013, Vol. 51, P. 1-17.
4. European Commission. Reference Document on Best Available Techniques (BAT) for the Manufacture of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
5. Ramasamy D., Balakrishnan K. Monitoring of particulate matter emissions in cement plants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, Vol. 189, Article 311.
6. Li J., Zhang Y., Xu D. Application of continuous emission monitoring systems in cement industry. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, Vol. 9, P. 105-112.
7. Лізунков О. В. Організація контролю викидів шкідливих речовин цементного заводу. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, Вип. 5 (36), Частина 1, Кропивницький : ЦНТУ, 2022, P. 183-188.
8. Максимів Ю. В. Моніторинг впливу на атмосферу виробництва портландцементу : кваліфікаційна робота магістра. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2024.
9. Stajanča M., Eštoková A. Environmental impacts of cement production. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 2012, № 737.
10. Holmes N. S., Morawska L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment*, 2006, Vol. 40, No. 30, P. 5902-5928.
11. Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. Sustainable cement production, present and future. *Cement and Concrete Research*, 2011, Vol. 41, No. 7, P. 642-650.

12. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013, 497 p.
13. ISO 13374-1:2012. Condition monitoring and diagnostics of machines, Data processing, communication and presentation, Part 1: General guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2012, 44 p.
14. OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Version 2.5.1. Needham, MA: Object Management Group, 2017, 794 p.
15. Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide (BAT Reference Document). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013, 541 p.
16. Резніченко О. В., Ляшенко О. А., Архипова В. В. Дослідження моделей баз даних для зберігання Big Data у сфері моніторингу довкілля. Системні технології, Український державний університет науки і технологій, 2024.
17. Литовченко І. В. ER-модель як засіб концептуального опису предметної області при проектуванні бази даних. Бакалаврська кваліфікаційна робота, Сумський державний університет, 2023.
18. ScienceDirect Topics. Physical Database Design – an overview. Elsevier, 2019.
19. Дерачис В. В. «Фізичне проектування бази даних: структура таблиць, типи даних та індекси». Бакалаврська робота, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025.
20. Bărbulescu A., et al. Cement Industry Pollution and Its Impact on the Environment and Population Health: A Review. Toxics, 2025.
21. Omer Alobaydy. Impacts of Cement Production on the Environment with Practical Solutions: A Critical Review. Journal of Research in Technology and Engineering, 2024.
22. Промислові інформаційні системи та мережі: підручник, О. В. Коваленко, І. М. Козловський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
23. Статистичні методи контролю та обробки вимірювальної інформації : навчальний посібник, В. М. Бондар, О. І. Погорілий. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016.

- 24.Мельник Л.Г. Екологічна економіка: підручник / Л.Г. Мельник. – Суми: Університетська книга, 2019. – 348 с.
- 25.Сотник І.М. Еколого-економічна оцінка виробництва: монографія / І.М. Сотник. – Суми: ТОВ "ТД "Папірус", 2016. – 272 с.
- 26.Ілляшенко С.М. Управління екологічними ризиками інновацій: монографія / С.М. Ілляшенко, О.В. Прокопенко. – Суми: ВТД "Університетська книга", 2018. – 214 с.
- 27.Хумарова Н.І. Інвестування: навчальний посібник / Н.І. Хумарова, Л.В. Лисяк. – Дніпро: Пороги, 2017. – 239 с.
- 28.Ковалев В.В. Финансовый менеджмент: теория и практика / В.В. Ковалев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Проспект, 2020. – 1104 с.
- 29.Brealey R.A. Principles of Corporate Finance / R.A. Brealey, S.C. Myers, F. Allen. – 13th ed. – McGraw-Hill Education, 2020. – 976 p.
- 30.Податковий кодекс України від 02.12.2010 № 2755-VI.
- 31.Балацький О.Ф. Економіка і фінансове забезпечення природоохоронної діяльності: підручник / О.Ф. Балацький, І.М. Синякевич. – Львів: Ліга-Прес, 2018. – 568 с.
- 32.ДБН В.2.5-28:2018. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення.
- 33.ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин.
- 34.НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин.
- 35.ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
- 36.ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони.
- 37.НПАОП 60.3-1.01-08. Правила охорони праці для працівників, зайнятих на роботах у хімічній промисловості.
- 38.НАПБ Б.07.005-86. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

- 39.ДСТУ-Н Б EN 1127-1:2008. Вибухонебезпечні середовища. Запобігання вибуху і захист від вибуху. Частина 1. Основні положення і методологія.
- 40.НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні.
- 41.НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про навчання з питань охорони праці.