

ТЕМА 5. СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО МОНІТОРИНГУ УМОВ ПРАЦІ: ДАТЧИКИ, АНАЛІТИКА, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ

Принципи роботи цифрових систем моніторингу виробничого середовища; застосування датчиків для контролю параметрів мікроклімату, шуму, вібрації, рівня шкідливих речовин та інших факторів ризику; використання аналітичних платформ для обробки та інтерпретації даних у режимі реального часу; інструменти візуалізації для наочного представлення результатів моніторингу та прогнозування тенденцій; роль систем цифрового моніторингу у підвищенні оперативності реагування та запобіганні нещасним випадкам на виробництві.

1. Принципи роботи цифрових систем моніторингу

1) Базова архітектура (шари системи)

1. **Сенсорний шар (Edge-рівень):** промислові датчики (температура/вологість, гази, шум, вібрації, пил РМ, освітленість), носимі пристрої (пульс, SpO₂, геопозиція, «розумні» каски), відеоаналітика (контроль ЗІЗ).
2. **Польова автоматика:** контролери/шлюзи (PLC/IPC) з локальною обробкою, буферизацією даних та базовою логікою безпеки (аварійне відключення).
3. **Комунікаційний шар:** дротові (Ethernet/RS-485) і бездротові мережі (Wi-Fi, BLE, LTE/5G, LoRaWAN), промислові протоколи (Modbus RTU/TCP, OPC UA, MQTT).
4. **Платформа даних (on-prem / хмара):** брокер повідомлень, time-series БД, сховище метаданих, служби очистки та нормалізації даних.
5. **Аналітика й правила:** потокова обробка (CEP), порогові правила, ML-моделі (прогноз відмов, визначення аномалій), карти ризиків.
6. **Візуалізація та взаємодія:** дашборди (Grafana/Power BI/Tableau), карти/3D-схеми цеху, мобільні застосунки, інтегровані панелі диспетчера.
7. **Реагування та інтеграції:** сповіщення (SMS/e-mail/push), керуючі команди у PLC/SCADA, обміни з EHS/ERP/HR/MES.

2) Життєвий цикл даних («від сенсора до рішення»)

Зняття показів: встановлення частоти дискретизації (напр., гази — 1–5 с; шум/вібрації — до 1 кГц), синхронізація часу (NTP/GPS).

Перетворення та калібрування: тарування сенсорів, компенсація дрейфу/температури, перевірка точності; збереження коефіцієнтів калібрування в паспорті пристрою.

Фільтрація та агрегація: ковзні середні/медіани, ресемплінг (1 с → 1 хв), видалення викидів, позначення якості (`quality_flag`).

Збагачення метаданими: місце, зона ризику, ID обладнання, зміна/бригада.

Зберігання: БД часових рядів (InfluxDB/TimescaleDB), політики ретенції (сирі — 14 днів; агрегати — 1 рік).

Інтерпретація: порівняння з нормами/гранично допустимими рівнями (ПДР), обчислення індексів (наприклад, тепловий стрес WBGT).

Дія: попередження/аварійна тривога, автоматичне керування, створення інцидент-картки в EHS.

3) Пороги, тривоги та «розумна» логіка

Рівні: *warning* (попереджувальний) і *alarm* (аварійний), опційно *critical*.

Гістерезис і антифлуд: щоб уникати «дребезгу» тривог (умова «вище порогу N секунд» + нижній поріг для зняття).

Ескалація: якщо «alarm» активний >2 хв — сповіщення майстру; >5 хв — начальнику зміни; >10 хв — черговому ОП.

Комбіновані правила: злиття кількох факторів (наприклад: $CO > 50$ ppm та людина в зоні A → пріоритет 1; тільки $CO > 50$ → пріоритет 2).

Приклад правил (псевдо):

```

IF gas.CO > 25 ppm FOR 30 s THEN ALERT("warning", zone="Ливарний цех")
IF gas.CO > 50 ppm FOR 15 s THEN
  ALERT("alarm", zone="Ливарний цех");
  SCADA.Ventilation("ON")
IF vibration.RMS > limit_eqp FOR 10 s AND temp.Bearing > 90°C THEN
  ALERT("alarm"); MES.MaintenanceOrder("URGENT")

```

4) Надійність, безперервність, кіберзахист

Надійність обладнання: резервування критичних датчиків, подвійне живлення (UPS/PoE), локальна буферизація даних на шлюзі (офлайн ≥ 2 год).

Доступність сервісів: кластер БД, реплікації, «гарячий» резерв; цілі: $availability \geq 99.5\%$, $MTTA/MTTR$ в регламенті.

Кібербезпека (IEC 62443 good practices): TLS для MQTT/HTTPS, VPN для віддаленого доступу, сегментація мереж ОТ/ІТ, контроль доступу (RBAC), журнал аудиту, регулярні ОТА-оновлення.

Цілісність даних та конфіденційність: хеш-підписи пакетів, шифрування в транзиті/на зберіганні, мінімізація персональних даних з wearables, відповідність GDPR/локальному законодавству.

5) Інтеграції та інтероперабельність

SCADA/MES: двонаправлена взаємодія (OPC UA/MQTT) — моніторинг → керуючі команди.

EHS/ERM: автоматичне створення інцидентів, оновлення карт ризиків, звітність ISO 45001.

ERP/HR: бюджети на ЗІЗ та навчання; допуск до робіт тільки після актуальної атестації/медогляду.

API та формати: REST/GraphQL, JSON/CSV/Parquet, довідники (обладнання, зони, користувачі).

6) Візуалізація та взаємодія користувачів

Ролі й персоналізація: оператор/диспетчер/керівник ОП/керівник виробництва — різні панелі та KPI.

Типові виджети: гейджі й «світлофори», теплові карти цеху, тренди часових рядів, TOP-зони/обладнання за інцидентами, SLAs реагування.

Прогнозні екрани: короткострокові прогнози (на 15–60 хв) для газів/температур/вібрацій; «що-якщо» для планових змін режимів.

Мобільність: PWA/мобільні застосунки — підтвердження тривоги, чек-лісти, фото/коментар, навігація до місця події.

7) Комісіонування, експлуатація та управління якістю

Проектування: аналіз ризиків → вибір сенсорів/класів вибухозахисту → план розміщення (покриття/тіні).

Валідація: приймальні випробування (Factory/Site Acceptance), перевірка похибок, латентності, сценаріїв аварій.

Експлуатація: графіки калібрувань, перевірки дрейфу, тестові ін'єкції даних/тривоги, контроль пропусків пакетів.

KPI системи: доступність, латентність доставки даних, точність/повнота, частка хибних тривог, MTTA/MTTR.

8) Норми та відповідність

Безпека праці: ISO 45001 (СУОП), ISO 31000 (ризик-менеджмент).

Функціональна безпека: IEC 61508 (SIL для критичних функцій).

Кібербезпека АСУ ТП: IEC 62443.

Дані й приватність: GDPR/локальні вимоги (носимі пристрої й відеоаналітика).

9) Міні-приклад цільової конфігурації (металургійний цех)

Сенсори: CO, температура/вологість, пил PM2.5, шум; у підшипниках — вібрація+температура.

Зв'язок: LoRaWAN (CO/PM), Wi-Fi (шум/температура), Ethernet (вібрація з PLC).

Правила: $CO > 25 \text{ ppm}$ (30 с) → warning; $CO > 50 \text{ ppm}$ (15 с) → alarm
+ вентиляція ON;
вібрація $RMS > \text{ліміту}$ & $T > 90^\circ\text{C}$ (10 с) → аварійний ремонт (MES).

Візуалізація: теплові карти цеху, тренди CO/PM, SLA реагування, TOP-зони ризику.

Інтеграції: SCADA (керування вентиляцією), EHS (інцидент-картка), ERP (замовлення фільтрів/датчиків).

Цифрова система моніторингу — це **замкнений цикл**: *точний вимір → надійна передача → якісні дані → аналітика → вчасне рішення → керована дія*. Лише при дотриманні принципів **точності, своєчасності, надійності та безпеки** вона реально знижує виробничі ризики й прискорює реагування.

5.2. Застосування датчиків для контролю факторів ризику

Цифрові системи моніторингу умов праці неможливі без використання датчиків, які забезпечують безперервний збір даних про виробниче середовище. Одним із найважливіших напрямів є контроль мікроклімату. Спеціальні сенсори вимірюють температуру, відносну вологість та швидкість руху повітря. Ці дані дозволяють оцінити комфортність робочого середовища, попереджати перегрів або переохолодження працівників, а також вчасно вживати заходів проти теплових ударів чи респіраторних ризиків.

Важливим завданням є моніторинг рівня шуму та вібрацій, оскільки тривалий вплив цих факторів може спричинити професійні захворювання. Шумоміри й вібраційні сенсори встановлюються як у робочих зонах, так і на обладнанні, що дозволяє контролювати дотримання гранично допустимих рівнів та прогнозувати технічні відмови. У машинобудуванні й енергетиці контроль вібрацій підшипників та двигунів дає можливість проводити своєчасне технічне обслуговування і запобігати аваріям.

Окрему роль відіграють газоаналізатори та датчики запиленості. Вони фіксують концентрацію шкідливих газів (CO, CO₂, метан, аміак, сірководень) та пилу різних фракцій (PM2.5, PM10). Такі сенсори особливо затребувані у шахтах, хімічній промисловості та аграрному секторі, де існує високий ризик вибухів, отруєнь та хронічних захворювань дихальних шляхів. Своєчасне спрацювання датчика може врятувати життя працівників, сигналізуючи про необхідність евакуації чи включення вентиляційних систем.

Не менш важливими є сенсори для контролю освітленості та радіаційного фону. Люксеметри дають можливість оцінювати умови зору працівників, а дозиметри контролюють рівень радіації у специфічних

галузях, таких як атомна енергетика чи медицина. Недостатнє або надмірне освітлення може бути причиною аварійності, тоді як перевищення допустимого рівня іонізуючого випромінювання становить серйозну загрозу здоров'ю.

Окремий клас становлять **wearables** — **носимі пристрої**. Це смарт-каски, браслети чи нагрудні датчики, які відстежують пульс, рівень кисню в крові, фізичну активність, стрес чи втому працівника. Дані з них у режимі реального часу передаються до єдиної системи, що дозволяє вчасно виявити перевтому, запобігти нещасним випадкам і підвищити ефективність планування змін. Такі технології дедалі частіше застосовуються у будівництві, логістиці та важкій промисловості.

Таким чином, датчики різних типів формують основу цифрових систем моніторингу охорони праці. Вони дозволяють не лише вимірювати параметри середовища, а й інтегрувати отримані дані у єдину систему аналізу та управління ризиками, що є ключовим для підвищення безпеки та збереження здоров'я працівників.

5.3. Аналітичні платформи для обробки даних

Аналітичні платформи є «мозком» цифрових систем моніторингу умов праці, адже саме вони перетворюють великі масиви сирих даних із датчиків на зрозумілу інформацію для прийняття управлінських рішень. Їхня головна функція — обробка, фільтрація, зберігання та інтерпретація даних у режимі реального часу.

SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition)

SCADA платформи традиційно використовуються на промислових підприємствах для управління технологічними процесами. У сфері охорони праці вони дозволяють отримувати дані з датчиків температури, тиску, газоаналізаторів та миттєво реагувати на перевищення порогових значень. Наприклад, у металургії SCADA автоматично запускає вентиляцію при перевищенні концентрації чадного газу, а в енергетиці — відключає турбіну при критичних вібраціях.

MES та ERP інтеграція

Дані з моніторингу можуть інтегруватися у **MES-системи** (Manufacturing Execution Systems), що відповідають за управління виробничими процесами, та **ERP-системи** (Enterprise Resource Planning), де

формується бюджет на охорону праці. Це дозволяє не тільки фіксувати інциденти, але й розраховувати економічні втрати від простоїв, планувати ремонт обладнання чи закупівлю засобів індивідуального захисту.

EHS-платформи (Environment, Health & Safety)

Спеціалізовані EHS-рішення, такі як **Intalex, Enablon, SAP EH&S**, призначені для комплексного управління безпекою праці. Вони збирають дані з різних сенсорів, формують **карти ризиків**, автоматично ведуть **реєстри інцидентів**, розраховують коефіцієнти ризику та готують звітність для аудитів ISO 45001. Наприклад, Enablon може поєднати інформацію від газоаналізаторів, носимих пристроїв і SCADA у єдину систему з автоматичними попередженнями.

Big Data та штучний інтелект

Аналітичні платформи з підтримкою Big Data та AI дозволяють працювати з мільйонами записів сенсорних показів і виявляти приховані закономірності. За допомогою алгоритмів машинного навчання визначаються аномальні ситуації та прогнозуються аварії ще до їх виникнення. Наприклад, AI-модуль у хімічній промисловості може розпізнати «підозрілу» комбінацію температури й тиску в реакторі й сигналізувати про потенційний ризик вибуху.

Хмарні сервіси IoT

Сучасні підприємства дедалі частіше використовують хмарні сервіси для збору та обробки даних: **Azure IoT Hub, AWS IoT Core, Google Cloud IoT**. Вони забезпечують масштабованість, можливість віддаленого доступу до даних та автоматичну інтеграцію з аналітичними інструментами Power BI або Tableau. Завдяки цьому інженери з охорони праці можуть отримувати дані у будь-який момент з мобільного пристрою.

Візуально-аналітичні інструменти (BI-платформи)

Щоб дані були зрозумілими для керівництва та персоналу, аналітичні платформи інтегруються з інструментами візуалізації: **Power BI, Tableau, Grafana**. Вони створюють **дашборди з показниками в реальному часі**, теплові карти, тренди зміни параметрів. Наприклад, у будівельній компанії Power BI використовується для відображення рівня шуму та пилу на різних ділянках об'єкта.

Значення аналітичних платформ

1. **Оперативність:** аналіз даних у режимі реального часу та миттєве реагування.
2. **Прогнозування:** використання історичних даних і AI для попередження аварій.
3. **Інтеграція:** об'єднання інформації з різних систем (SCADA, ERP, EHS, IoT).
4. **Прозорість:** формування цифрових архівів для аудитів і сертифікацій.
5. **Зручність:** наочна подача даних у вигляді дашбордів, карт ризиків і прогнозних графіків.

5.4. Інструменти візуалізації

Візуалізація є ключовим етапом роботи цифрових систем моніторингу, адже саме від того, наскільки наочно й зрозуміло представлені дані, залежить швидкість прийняття управлінських рішень. Сучасні інструменти дають можливість не тільки бачити поточні показники, але й аналізувати тенденції, прогнозувати розвиток подій та демонструвати дані у зручному для різних рівнів управління форматі.

Дашборди (Dashboard Systems)

Дашборди – це інтерактивні панелі з ключовими показниками, які збирають дані з різних сенсорів і платформ у єдиний інтерфейс. Вони можуть містити **гейджі (лічильники), графіки, індикатори світлофорного типу** (зелений – норма, жовтий – попередження, червоний – аварія). Наприклад, у **Power BI** або **Grafana** диспетчер може в реальному часі бачити концентрацію CO у цеху, рівень шуму й температуру, а також отримувати миттєві повідомлення про перевищення порогів.

Теплові карти (Heat Maps)

Heat Maps дозволяють відображати рівні небезпеки у просторі: робочий цех, будівельний майданчик, шахта або склад. Зони з низьким ризиком позначаються зеленим кольором, середнім – жовтим, високим – червоним. Такі карти особливо корисні для **географічної локалізації небезпечних факторів**. Наприклад, у системі **Enablon** можна накласти дані з газоаналізаторів на план заводу і побачити, де концентрація аміаку перевищує норму.

Трендові графіки та часові ряди

Аналітичні системи будують динаміку зміни параметрів у часі. Це дозволяє аналізувати сезонні коливання температури, поступове зростання рівня вібрацій чи шуму, появу аномалій. У **Tableau** або **Grafana** можна відобразити довгостроковий тренд і виявити, що певне обладнання поступово виходить з ладу.

3D-візуалізація виробничого середовища

Інноваційним напрямом є застосування **3D-моделей виробничих цехів** з накладанням даних сенсорів. Працівник або диспетчер може «пройтися» віртуальним цехом і побачити, у якій саме зоні перевищено рівень шуму чи газу. Наприклад, у системах **Bentley Digital Twin** та **Siemens MindSphere** відображаються цифрові двійники підприємств із вбудованими ризиками.

VR/AR-інструменти

Віртуальна та доповнена реальність відкривають нові можливості для наочного навчання та реагування.

- **VR-тренажери** дозволяють моделювати аварійні ситуації (наприклад, пожежу чи витік газу) та відпрацьовувати правильні дії персоналу.
- **AR-окуляри** накладають інформацію про небезпеки безпосередньо на реальне виробниче середовище: наприклад, робітник бачить у своїй касці дані про концентрацію пилу в зоні, де він працює.

Автоматичні звіти та мобільні додатки

Крім стаціонарних панелей, візуалізація доступна й у вигляді **мобільних застосунків**, які надсилають push-сповіщення про небезпечні ситуації. Автоматичні звіти з графіками й картами можуть надходити керівникам на email у вигляді PDF або інтерактивних посилань.

Значення візуалізації

1. **Швидке реагування:** зрозумілі індикатори дозволяють миттєво оцінити ситуацію.
2. **Прогнозування:** тренди й моделі допомагають передбачати аварії.
3. **Прозорість:** карти й дашборди підвищують довіру працівників і керівництва.

4. **Навчання:** VR/AR роблять підготовку працівників реалістичною й ефективною.

5.5. Роль систем цифрового моніторингу у підвищенні оперативності реагування та запобіганні нещасним випадкам

Цифрові системи моніторингу відіграють ключову роль у забезпеченні **швидкого реагування на небезпечні ситуації** та значному зменшенні кількості виробничих травм. Їхня ефективність полягає у здатності **поєднувати сенсорні технології, аналітичні платформи та автоматизовані механізми управління** у єдину систему безпеки.

Оперативність реагування

Завдяки безперервному збору даних датчики фіксують відхилення від нормативів у режимі реального часу. При досягненні критичних порогів система автоматично запускає **сценарії аварійного реагування**: вмикає вентиляцію, відключає обладнання, подає сигнал тривоги персоналу. Це дозволяє скоротити час від моменту виявлення небезпеки до початку дій із хвилин до секунд. Наприклад, газоаналізатор у шахті здатен попередити вибух метану ще до того, як концентрація стане критичною.

Превентивний характер систем

Цифрові рішення не тільки фіксують небезпеку, але й прогнозують її виникнення. Аналітичні модулі на основі **Big Data та AI** виявляють закономірності у зростанні рівня вібрацій, шуму чи концентрації шкідливих речовин. Це дозволяє проводити **попереджувальні ремонти та евакуаційні заходи** до виникнення інцидентів. Наприклад, у металургії аналіз вібраційних даних дає можливість передбачити відмову підшипника й уникнути аварії доменної печі.

Підвищення прозорості та відповідальності

Зібрані дані автоматично зберігаються у цифрових архівах і формують **карти небезпек та журнали інцидентів**. Це забезпечує прозорість роботи служби охорони праці, полегшує аудит ISO 45001 і дозволяє керівництву оперативно оцінювати ситуацію. Крім того, працівники, маючи доступ до індикаторів безпеки, починають більш відповідально ставитися до дотримання правил.

Зниження людського фактору

У багатьох випадках причиною нещасних випадків є **затримка з боку людини** — невчасне виявлення небезпеки або помилки у прийнятті рішення. Автоматизовані системи усувають цю проблему, адже реагування закладене у вигляді **алгоритмів** і відбувається без участі людини. Це особливо важливо у випадках, коли йдеться про токсичні гази або аварійні розливи хімічних речовин.

Соціально-економічний ефект

Завдяки зменшенню аварій та травматизму підприємство не лише зберігає життя й здоров'я працівників, а й скорочує фінансові витрати: зменшуються виплати компенсацій, страхові внески та витрати на ремонт обладнання. Впровадження цифрових систем підвищує **довіру працівників до роботодавця** та зміцнює його імідж як соціально відповідальної компанії.

Таким чином, системи цифрового моніторингу є **ключовим інструментом превентивної безпеки**, що забезпечує:

- миттєве реагування на небезпеку;
- прогнозування потенційних ризиків;
- прозорість і контроль усіх інцидентів;
- зниження ролі людського фактору;
- економічну вигоду та соціальну відповідальність.

Контрольні запитання

1. У чому полягає принцип роботи цифрових систем моніторингу умов праці?
2. Які основні параметри мікроклімату контролюються датчиками у виробничому середовищі?
3. Яке значення мають сенсори шуму та вібрації для охорони праці?
4. Які небезпечні речовини можна контролювати за допомогою газоаналізаторів?
5. Яку роль відіграють носимі пристрої (wearables) у забезпеченні безпеки працівників?
6. Які основні функції виконують аналітичні платформи у сфері моніторингу умов праці?
7. Які можливості відкриває використання Big Data та AI у прогнозуванні небезпечних ситуацій?
8. Для чого застосовуються теплові карти (Heat Maps) у візуалізації даних?

9. Як VR/AR-технології можуть використовуватися у сфері навчання з охорони праці?

10. У чому полягає роль цифрових систем моніторингу у запобіганні нещасним випадкам?