

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії

Барановський Владислав Олександрович

Серверна платформа для моніторингу екологічних
параметрів у системі "розумного" міста / Server platform for
monitoring environmental parameters in the "smart" city
system

спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійна програма – Комп'ютерна інженерія

Кваліфікаційна робота

Виконав: студентка групи KI-42
Барановський Владислав Олександрович

Науковий керівник
к.т.н. Гураль І.В.

Тернопіль 2025

АНОТАЦІЯ

Барановський В.О. Серверна платформа для моніторингу екологічних параметрів у системі ""розумного"" міста. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія», освітньо-професійна програма. Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

Робота написана обсягом 50 сторінок і містить 9 рисунків, 5 таблиць, 3 додатки та 33 джерел за переліком посилань. Обсяг графічного матеріалу 2 аркуші формату А3.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка серверної програмної платформи для моніторингу екологічних параметрів, що забезпечує централізоване управління даними, їх попередню обробку, зберігання та представлення у зручному для користувача форматі. Розгорнуто середовище ThingsBoard, зареєстровано сенсорні пристрої, налаштовано обробку телеметрії та створено інтерактивні дашборди, користувач у зручній формі може відстежувати екологічні показники в реальному часі. Виконано тестування платформи в умовах, наближених до експлуатаційних, із перевіркою коректності збору даних, візуалізації та реакції на перевищення порогових значень, що підтвердило працездатність системи та ефективність її компонентів.

Ключові слова: МОНІТОРИНГ, ЕКОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ, «РОЗУМНЕ» МІСТО, THINGSBOARD.

ANNOTATION

Baranovsky V.O. Server platform for monitoring environmental parameters in the "smart" city system. – Manuscript.

Qualification work for the Bachelor degree in specialty 123 “Computer Engineering”, educational and professional program. Western Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The work is written in 50 pages and contains 9 figures, 5 tables, 3 appendices and 33 references. The volume of graphic material is 2 sheets of A3 format.

The purpose of the qualification work is to develop a server software platform for monitoring environmental parameters, which provides centralized data management, pre-processing, storage and presentation in a user-friendly format. The ThingsBoard environment has been deployed, sensor devices have been registered, telemetry processing has been configured and interactive dashboards have been created, the user can monitor environmental indicators in real time in a convenient way. The platform has been tested in conditions close to operational ones, with verification of the correctness of data collection, visualization and response to exceeding threshold values, which confirmed the operability of the system and the efficiency of its components.

Keywords: MONITORING, ENVIRONMENTAL PARAMETERS, "SMART" CITY, THINGSBOARD..

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз технологій екологічного моніторингу в умовах міста.....	12
1.1. Поняття та завдання екологічного моніторингу	12
1.2. Аналіз сучасних систем екологічного моніторингу "розумних" міст	15
1.3 Платформи збору даних та постановка завдань роботи	18
2. Розробка архітектури системи та моделі збудованих	24
2.1 Аналіз типових сценаріїв застосування системи	24
2.2 Архітектура системи моніторингу на базі ThingsBoard.....	27
2.3 Моделювання збору екологічних даних	29
3 Реалізація, розгортання та тестування системи моніторингу.....	35
3.1 Розгортання програмної платформи	35
3.2 Реєстрація пристроїв і конфігурація системи	37
3.3 Тестування та оцінка ефективності платформи	40
Висновки	47
Список використаних джерел	48
Додаток А Техніко-економічне обґрунтування розробки	51
Додаток Б Шаблони JSON.....	64
Додаток В Світлокопії виданих публікацій.....	67

					КР.КІ.10660380.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Барановський.В				Серверна платформа для моніторингу екологічних параметрів у системі "розумного" міста	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Гураль І.В.						7	
Консульт.	Савка Н.Я.					ЗУНУ,ФКІТ, КІ-42		
Н. Контр.								
Затвердив	Дубчак Л.О.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

IoT	–	Internet of Things
AIC	–	автоматизовані інформаційні системи
ГІС	–	геоінформаційна система

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

ВСТУП

В умовах інтенсивного розвитку інфраструктури та зростання антропогенного навантаження особливої актуальності набуває впровадження цифрових технологій для постійного екологічного моніторингу в міському середовищі. Висока щільність населення, наявність промислових і транспортних об'єктів, недостатній контроль за джерелами забруднення — все це створює численні ризики для здоров'я населення та стабільності міських екосистем.

Традиційні засоби спостереження за станом довкілля виявляються недостатньо гнучкими, масштабованими та інформативними в умовах динамічних змін урбаністичного простору. Водночас, технології Інтернету речей або Internet of Things (IoT) відкривають нові можливості для створення адаптивних, масштабованих і автоматизованих систем моніторингу, які дозволяють в реальному часі збирати екологічні дані з великої кількості сенсорів, що розташовані у різних функціональних зонах міста: біля шкіл, у парках, на транспортних артеріях або у промислових районах.

Розробка інтелектуальної екологічної підсистеми як компонента "розумного міста" дозволяє муніципалітетам не лише здійснювати оперативний моніторинг критичних показників (наприклад, концентрації CO₂, рівня шуму чи кислотності води), але й приймати на їх основі превентивні рішення, налагоджувати інформаційне сповіщення громадян і формувати стратегії сталого розвитку міського простору.

Таким чином, створення адаптивної серверної платформи для моніторингу екологічних параметрів, побудованої на базі IoT-сенсорів і здатної до автоматичної обробки, зберігання та візуалізації даних, є вкрай актуальним завданням, що відповідає сучасним викликам у сфері урбаністики, екології та цифрового управління міською інфраструктурою.

Об'єктом дослідження є системи екологічного моніторингу, інтегрована в інфраструктуру "розумного" міста. Предметом дослідження виступають алгоритми збору, обробки, зберігання та візуалізації екологічних даних, що

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надходять з розподіленої мережі сенсорів. Мета кваліфікаційної роботи полягає в розробці серверної програмної платформи для моніторингу екологічних параметрів, що забезпечує централізоване управління даними, їх попередню обробку, зберігання та представлення у зручному для користувача форматі.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз сучасних технологій екологічного моніторингу;
- розробити структури даних та алгоритми збору інформації;
- спроектувати архітектуру серверної частини для централізованої обробки даних;
- реалізувати прототип серверної платформи з інтерактивним інтерфейсом візуалізації;
- провести тестування системи моніторингу.

Результати дослідження апробовано на II Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» [1] (додаток В).

Практична значущість полягає у створенні універсального програмного рішення, яке може бути адаптоване для потреб муніципалітетів, екологічних служб та дослідницьких установ..

У першому розділі проведено теоретичний аналіз понять, завдань і функцій екологічного моніторингу в урбанізованому середовищі, розглянуто існуючі реалізації систем моніторингу в "розумних" містах, а також проаналізовано доступні IoT-платформи для збору екологічних даних

У другому розділі розроблено загальну архітектуру інформаційної системи екологічного моніторингу на базі платформи ThingsBoard, описано типові сценарії її застосування, а також запропоновано формалізовану модель генерації конфігурацій для автоматизованого збору, обробки та візуалізації екологічних даних із розподіленої мережі сенсорів.

У третьому розділі виконано практичну реалізацію запропонованої моделі, розгорнуто серверну платформу.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ В УМОВАХ МІСТА

1.1. Поняття та завдання екологічного моніторингу

Екологічний моніторинг можна розглядати як систематичний, довготривалий процес спостереження, збору, зберігання, аналізу та інтерпретації інформації про стан навколишнього середовища. З екологічної точки зору, його основною метою є виявлення змін у параметрах довкілля (забруднення повітря, води, ґрунтів, акустичне та електромагнітне навантаження, кліматичні коливання тощо), спричинених як природними, так і антропогенними чинниками.

У свою чергу, інформаційні технології забезпечують інфраструктурну та методологічну основу для реалізації моніторингових систем. Завдяки впровадженню розподілених мереж сенсорів (IoT), протоколів передачі даних (наприклад MQTT [2], CoAP), систем керування базами даних (PostgreSQL, InfluxDB) та засобів аналітики (BI-системи, нейронні мережі), екологічний моніторинг перетворюється з періодичного фіксування параметрів у динамічну інформаційну систему з можливістю прийняття оперативних управлінських рішень.

Система екологічного моніторингу в умовах урбанізації виконує низку критично важливих функцій, спрямованих на забезпечення сталого розвитку міського середовища та підвищення якості життя населення.

По-перше, така система здійснює безперервний контроль екологічного стану, що включає вимірювання ключових параметрів — як-от концентрація твердих частинок (PM2.5, PM10), рівень вуглекислого газу, температура, вологість, шумове навантаження тощо. Це дозволяє фіксувати відхилення від нормативних показників та оперативно реагувати на критичні ситуації.

По-друге, система реалізує збір, накопичення та обробку екологічних даних, що формує емпіричну базу для просторово-часового аналізу динаміки забруднення, виявлення сезонних або технологічних закономірностей та прогнозування екологічних ризиків.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По-третє, вона виконує інформаційну та аналітичну функцію, забезпечуючи науково обґрунтовану підтримку прийняття рішень на рівні муніципального управління. Зокрема, результати моніторингу використовуються для розроблення програм екологічної безпеки, адаптації міського планування та впровадження екологічно орієнтованих технологій.

Нарешті, система відіграє соціальну та освітню роль, підвищуючи обізнаність населення щодо стану довкілля через відкриті платформи візуалізації даних і сприяючи формуванню екологічної свідомості громадян у межах цифрового міста.

Завдання які вирішує система екологічного моніторингу охоплюють як оперативне реагування, так і стратегічне планування екологічної політики територіальних громад та органів виконавчої влади.

1. Збір первинної екологічної інформації — передбачає організацію спостережень за станом природного середовища (повітря, води, ґрунтів, біоти), фіксацію показників у визначених контрольних точках із заданою періодичністю. Застосовуються автоматизовані системи, мобільні лабораторії, дистанційне зондування.

2. Оцінка стану довкілля — полягає у співставленні отриманих даних із встановленими нормативами та гранично допустимими концентраціями. На цьому етапі виконується виявлення джерел забруднення, їхньої просторової локалізації та ступеня впливу на екосистему.

3. Прогнозування екологічних змін — включає використання математичних моделей для моделювання сценаріїв розвитку ситуацій у разі збереження або зміни параметрів впливу, що дає змогу здійснювати екологічне планування та розробку запобіжних заходів.

4. Інформаційне забезпечення управлінських рішень — полягає у підготовці аналітичних звітів, візуалізацій, інтерактивних карт і передачі даних до відповідних державних структур, місцевих органів влади, підприємств, громадських організацій та населення. Така інформація слугує основою для розроблення стратегій сталого розвитку територій.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автоматизовані інформаційні системи (АІС) відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності сучасного екологічного моніторингу [3], оскільки дозволяють забезпечити оперативність, масштабованість та точність збору й аналізу даних про стан довкілля.

По-перше, АІС забезпечують високий ступінь автоматизації процесів спостереження, що дає змогу здійснювати постійний або періодичний моніторинг великої кількості параметрів у реальному часі. Завдяки використанню розподілених мереж сенсорів (ІоТ) мінімізується потреба в ручному зборі даних, що підвищує об'єктивність і регулярність вимірювань.

По-друге, інформаційні системи значно полегшують зберігання, обробку та візуалізацію екологічної інформації. Інтеграція баз даних, аналітичних модулів та геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє формувати багатовимірні просторово-часові моделі забруднення, аналізувати динаміку змін та прогнозувати екологічні ризики з високим рівнем точності.

По-третє, АІС є незамінним інструментом для прийняття управлінських рішень, оскільки забезпечують своєчасне інформування зацікавлених сторін (органів влади, підприємств, громадськості) про критичні екологічні події. Завдяки автоматизованим попереджувальним системам можлива швидка реакція на порушення нормативів та запобігання екологічним катастрофам.

Нарешті, автоматизовані системи сприяють відкритості й доступності екологічних даних, що підвищує рівень екологічної обізнаності населення та стимулює формування екологічної відповідальності. Таким чином, АІС є необхідним елементом сучасної екологічної інфраструктури "розумного" міста та інструментом підтримки сталого розвитку територій.

Діаграма на рисунку 1.1 демонструє чотири основні функції АІС:

1. збір екологічних даних — забезпечується сенсорами ІоТ та протоколами передачі;
2. обробка та зберігання здійснюється в базах даних із часовими рядами;
3. аналіз та прогнозування реалізуються за допомогою алгоритмів моделювання;

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

4. інформування та візуалізація підтримується через ВІ-інструменти й вебінтерфейси.

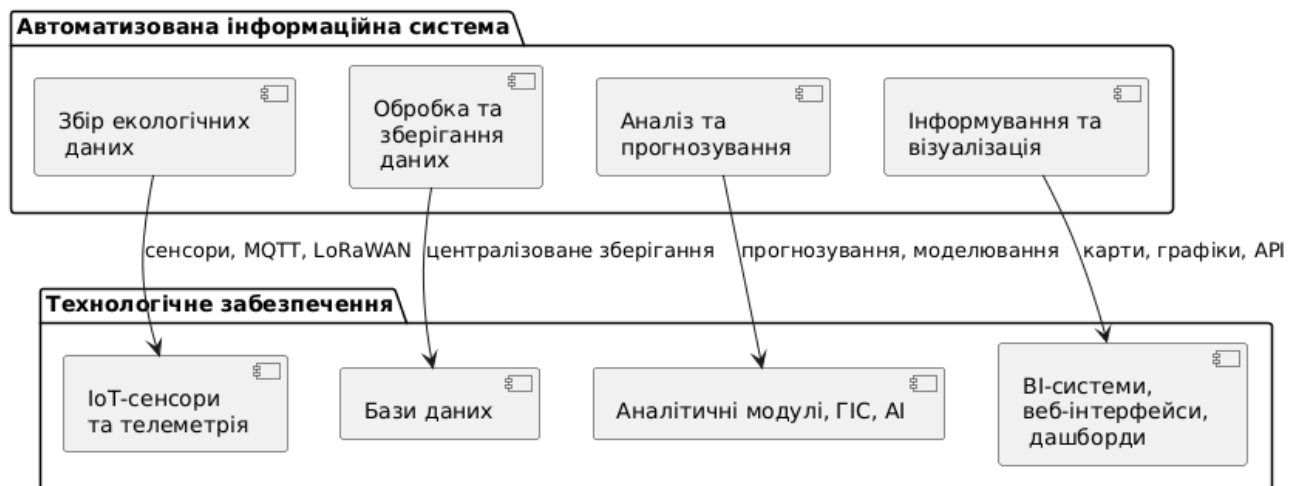


Рисунок 1.1 - Роль автоматизованих інформаційних системи у екологічному моніторингу

1.2. Аналіз сучасних систем екологічного моніторингу "розумних" міст

Місто Барселона (Іспанія) є піонером у впровадженні відкритих екологічних даних. Міська рада розробила платформу Sentilo [4] — відкриту систему збору та обміну даними з понад 18 000 сенсорів, які вимірюють якість повітря, шум, температуру, вологість, рівень освітлення та інші параметри. Ця платформа дозволяє інтегрувати дані з різних джерел і забезпечує прозорість для громадськості та розробників [5].

Sentilo — це відкрита платформа для збору, обробки та розповсюдження даних від сенсорів і виконавчих пристроїв, розроблена для інтеграції в архітектуру "розумного міста". Вона була ініційована міською радою Барселони та підтримується спільнотою відкритого програмного забезпечення.

Основні функції та їх забезпечення в Sentilo:

1. кроссплатформеність - платформа розроблена з використанням Java, Redis і MongoDB, що забезпечує її сумісність з різними операційними системами та легкість розгортання в різних середовищах;

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

2. підтримка простого REST API для надсилання та отримання даних від сенсорів, команд і тривог, що полегшує інтеграцію з іншими системами та додатками;

3. підтримка механізмів агентів і тригерів, які дозволяють новим значенням, отриманим від сенсорів, викликати певні дії, такі як сповіщення, обчислення, статистичний аналіз або надсилання повідомлень.

4. веб-інтерфейс (фронтенд-додаток) надає можливості для перегляду сенсорів, каталогу, статистики та адміністрування системи, що забезпечує зручне управління та моніторинг.

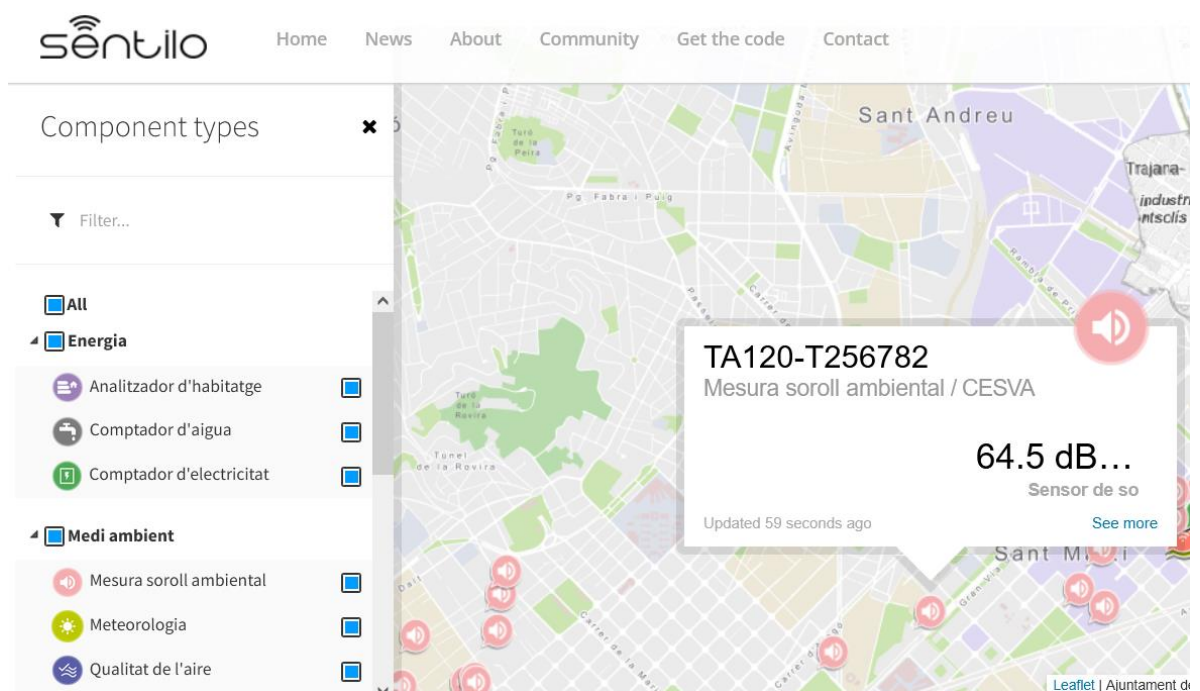


Рисунок 1.2 - Платформа Sentilo

Проект Smart Citizen — ініціатива Fab Lab Barcelona — надає громадянам інструменти для збору екологічних даних за допомогою персональних сенсорів [6]. Це сприяє залученню мешканців до моніторингу довкілля та підвищує обізнаність про екологічні проблеми.

Місто Сеул (Південна Корея) активно впроваджує екологічний моніторинг через «Smart City Integrated Platform», яка об'єднує дані з тисяч сенсорів для моніторингу якості повітря, шуму, освітлення та інших параметрів у реальному часі. Ці дані використовуються для підтримки політик міста та оперативного реагування на екологічні проблеми [7].

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

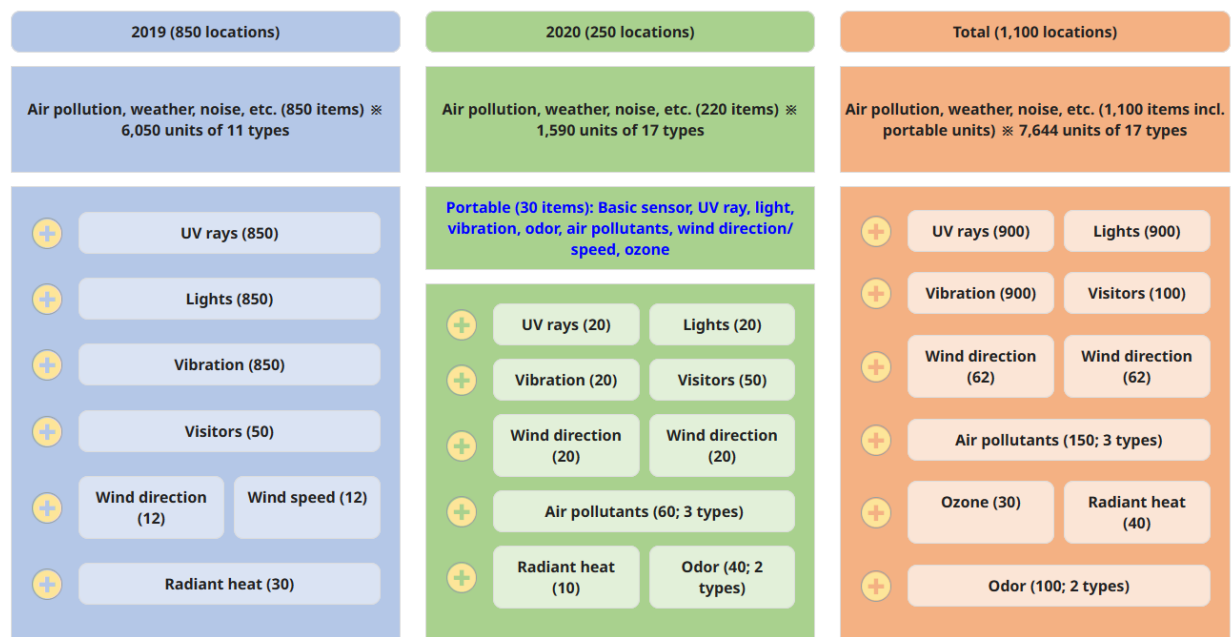


Рисунок 1.3 – Розвиток системи моніторингу міста Сеул [7]

Компанія Ecube Labs розробила смарт-контейнери для сміття з сенсорами, які моніторять рівень заповнення та оптимізують маршрути збору відходів, що сприяє зменшенню викидів та підвищенню ефективності управління відходами [8].

Місто Сінгапур реалізує національну ініціативу Smart Nation, яка включає інфраструктуру Smart Nation Sensor Platform (SNSP). Ця інфраструктура, що забезпечує збір та аналіз екологічних даних, таких як якість повітря, рівень шуму та інші параметри, з метою підтримки сталого розвитку та покращення якості життя громадян [9].

Система Virtual Singapore [10] - це високоточна 3D-модель міста, яка інтегрує реальні дані про будівлі, інфраструктуру, рух населення та екологічні фактори. Ця платформа дозволяє моделювати різні сценарії, такі як вплив нових інфраструктурних проектів або надзвичайних ситуацій, на довкілля та міське середовище.

Системи екологічного моніторингу широко досліджуються в академічній спільноті. Робота [11] представляє інноваційну екосистему інформаційно-комунікаційних технологій для збору, обробки та розповсюдження геопросторової інформації про вплив забруднення та мікрокліматичних умов на якість життя в "розумних" містах.

1.3 Платформи збору даних та постановка завдань роботи

Екологічна підсистема в архітектурі «Smart City» є одним із ключових функціональних блоків, що забезпечують стале управління міським середовищем. Її архітектура є багаторівневою та включає апаратні, програмні й аналітичні компоненти, що взаємодіють у межах єдиної інформаційної екосистеми (рисунок 1.4).

Сенсорний рівень (рівень збору даних) включає розподілені мережі сенсорів (IoT-пристроїв). Сенсори вимірюють параметри якості повітря (PM2.5, CO₂, NO₂), рівень шуму, освітлення, радіаційний фон, температуру, вологість тощо. Сенсори розміщуються на вуличних стовпах, зупинках, транспортних засобах або будівлях. Ці пристрої мають автономне живлення та модулі зв'язку (наприклад, LoRa, NB-IoT, Wi-Fi).

Рівень комунікаційної інфраструктури описує передачу даних від сенсорів до обчислювальних центрів забезпечується через бездротові або дротові мережі з використанням протоколів MQTT, HTTP/REST або CoAP. Рівень є критично важливим для забезпечення безперервного потоку інформації в реальному часі.

У центральному сегменті системи функціонують сервери обробки даних (back-end), що приймають, зберігають і обробляють екологічну інформацію. Вони включають бази даних (наприклад, PostgreSQL, InfluxDB), аналітичні модулі (наприклад, обробка часових рядів, прогнозування на основі ML) та засоби взаємодії з іншими підсистемами (API, брокери повідомлень, черги подій).

Аналітичний та інтерфейсний рівень (front-end). Доступ до даних забезпечується через інтерактивні панелі візуалізації (BI-системи, вебінтерфейси), що відображають карти забруднення, часові тренди, попередження про перевищення допустимих норм. Також реалізуються функції адміністрування, управління політиками сповіщення, формування звітів.

Додатково екологічна підсистема може бути інтегрована з транспортними, енергетичними, санітарними службами міста, що дозволяє реалізувати комплексний підхід до управління урбанізованими територіями на основі даних.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Типова архітектура екологічної підсистеми в межах «Smart City». У діаграмі виділено рівні сенсорів, передачі даних, обробки, аналітики та візуалізації:

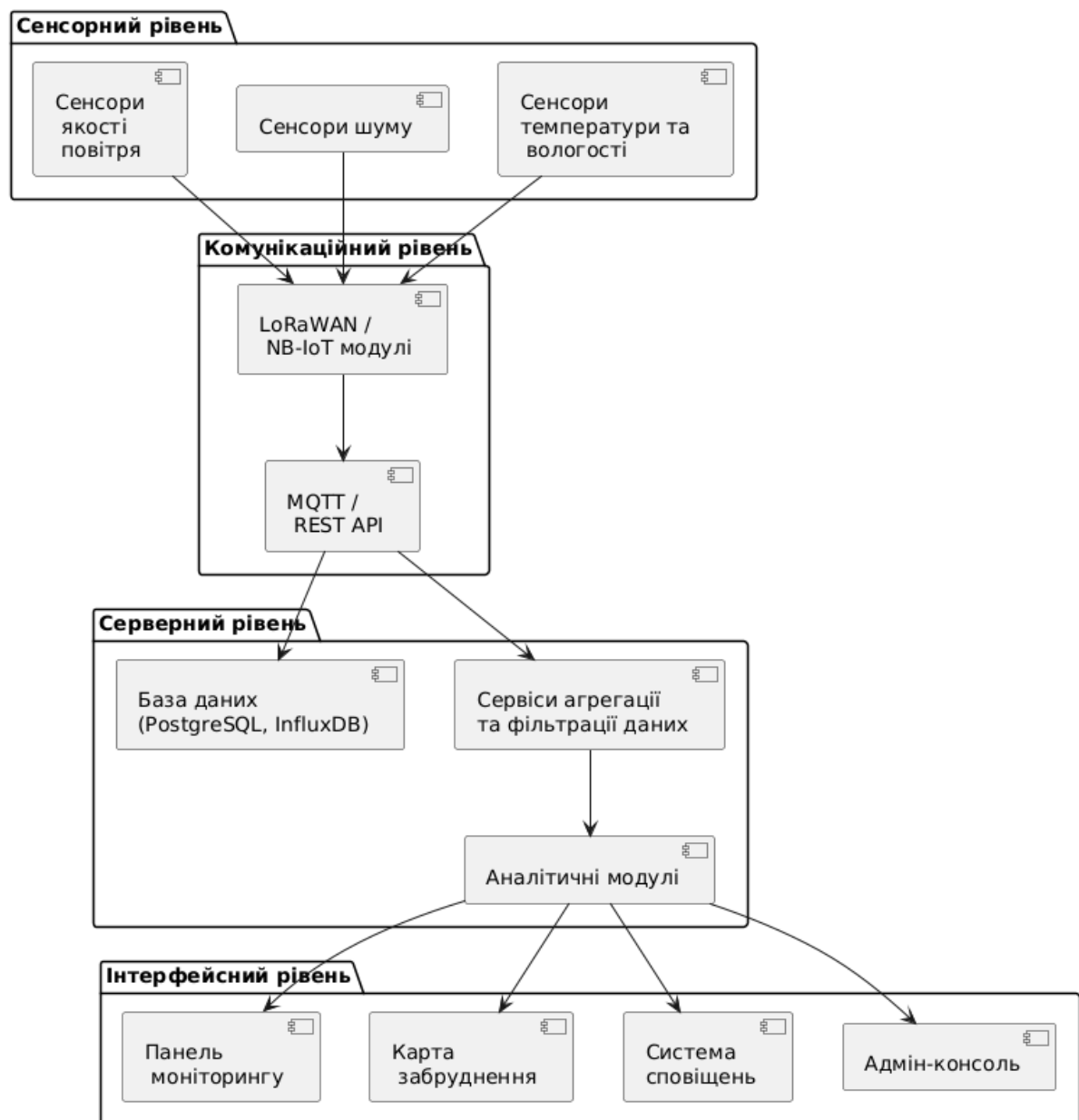


Рисунок 1.4 - Екологічна підсистема «розумного міста»

Ця діаграма відображає логічну послідовність проходження екологічних даних від збору до кінцевого користувача, з урахуванням типових технологій.

Розглянемо відкриту IoT-платформу ThingsBoard для збору, обробки, візуалізації та управління даними з підключених пристроїв Інтернету речей (рисунок 1.5).

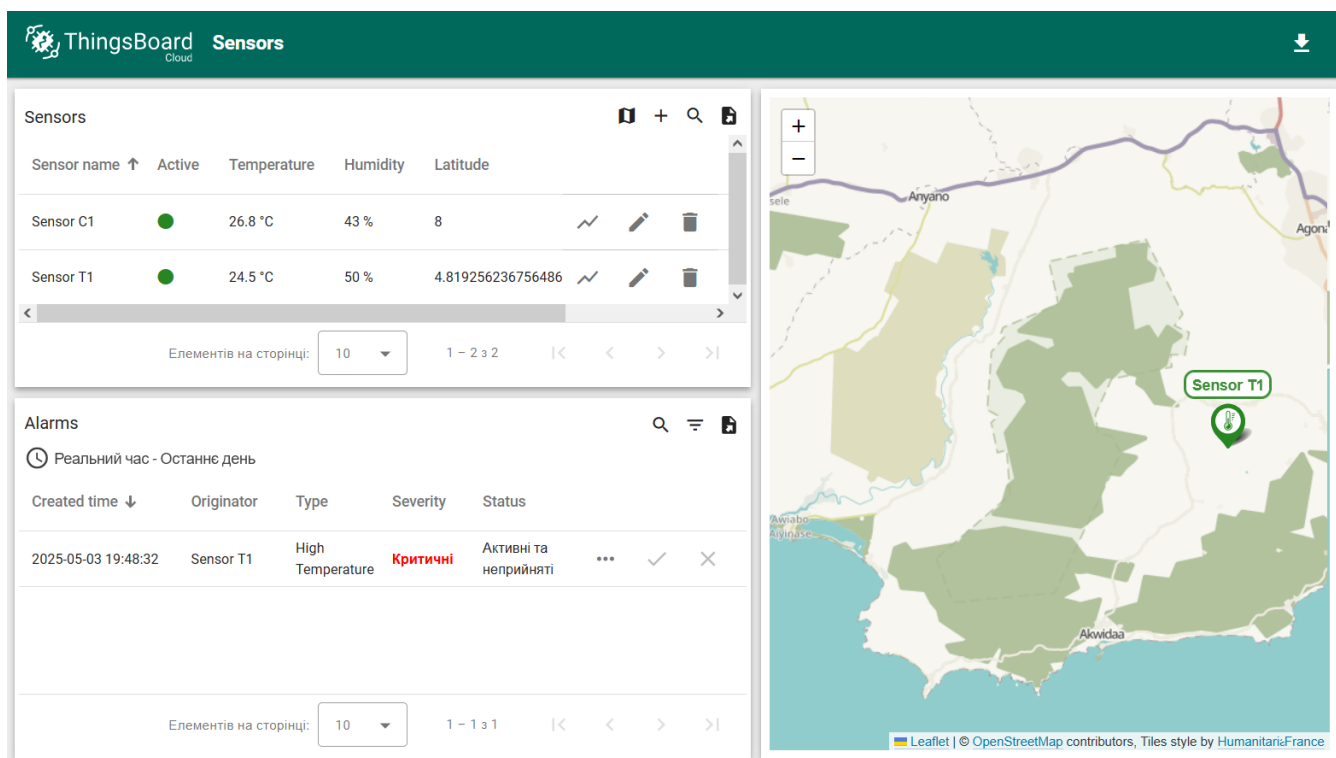


Рисунок 1.5 - Головне вікно платформи ThingsBoard

Проаналізуємо сценарії використання платформи ThingsBoard у прикладних галузях, пов'язаних з екологічним моніторингом, а також узагальнені висновки щодо її придатності для впровадження в системи «розумного» міста.

У сфері моніторингу навколишнього середовища платформа ThingsBoard застосовується для побудови систем безперервного спостереження за такими параметрами, як температура, вологість, атмосферний тиск, рівень освітлення, швидкість вітру та інтенсивність опадів. Сенсорні пристрої можуть бути розміщені в урбанізованих районах, на промислових об'єктах, у природоохоронних зонах або міських парках. Платформа забезпечує візуалізацію даних у вигляді інтерактивних дашбордів, підтримує налаштування порогових тригерів для своєчасного реагування на відхилення параметрів, а також зберігає історичні дані для подальшого аналізу тенденцій і динаміки.

У сфері обліку споживання води ThingsBoard інтегрується з ультразвуковими або механічними водомірами, обладнаними цифровими інтерфейсами для передавання показників. Система дозволяє автоматизовано отримувати дані з лічильників, що забезпечує віддалене зчитування показників у реальному часі. Крім того, реалізовано можливості виявлення витоків, аналіз

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

аномального споживання та формування детальних звітів для кінцевих користувачів або комунальних підприємств.

У контексті розумного землеробства платформа використовується для моніторингу кліматичних умов у теплицях, аграрних угіддях, сховищах і контрольних зонах. Система дозволяє автоматизувати керування мікрокліматом, зокрема опаленням, вентиляцією та системами зрошення, на основі даних із сенсорів вологості, освітленості та температури. Зібрані дані використовуються для побудови прогнозних моделей урожайності.

У рамках інтелектуального обліку ресурсів ThingsBoard дозволяє інтегрувати електричні, газові та теплові лічильники в централізовану систему збору та обробки даних. Платформа забезпечує контроль споживання енергоресурсів у реальному часі, аналізує пікові навантаження та дозволяє виявляти втрати у мережах, що критично важливо для енергоефективного управління інфраструктурою.

Для моніторингу якості повітря ThingsBoard приймає дані від сенсорів концентрації пилу [12] (PM2.5, PM10), вуглекислого газу (CO₂), а також діоксидів азоту, сірки й інших забруднювальних речовин. Платформа візуалізує рівні забруднення у вигляді графіків і теплових карт, дозволяє прогнозувати ймовірні епізоди перевищення гранично допустимих концентрацій та надсилати попереджувальні сповіщення мешканцям ризикових районів.

У системах розумного зрошення ThingsBoard забезпечує автоматизоване керування поливом на основі показників вологості ґрунту, метеоданих та часу доби. Це дозволяє значно зменшити витрати води, запобігти пересушуванню або надмірному зволоженню культур, а також реалізувати віддалений контроль і управління з боку агровиробника або системи.

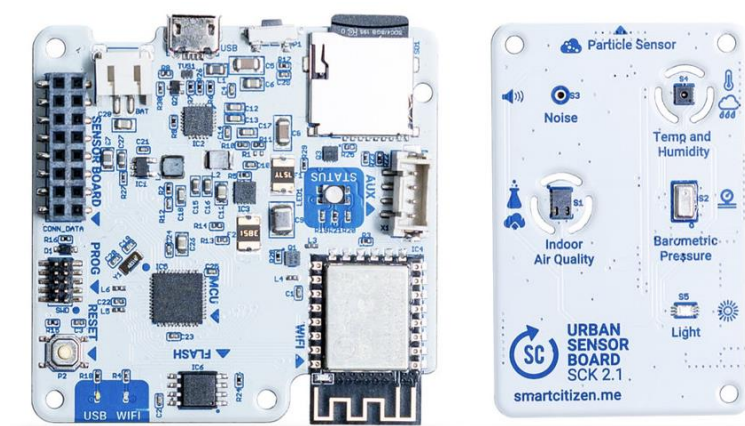
У сфері управління відходами ThingsBoard використовується для моніторингу рівня заповненості контейнерів, їх просторового розміщення та технічного стану. Платформа підтримує побудову оптимізованих маршрутів руху сміттєзбиральної техніки, що дозволяє скоротити витрати на паливо та час обслуговування, а також запобігти переповненню баків та виникненню антисанітарних умов.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальні висновки для екологічного моніторингу:

1. Платформа здатна об'єднувати різні типи сенсорів і джерел даних в одну систему, що дозволяє створити комплексну і масштабовану екологічну підсистему «розумного» міста.
2. Модульність та інтероперабельність. Вбудовані інтерфейси (MQTT, REST API, OPC-UA) забезпечують інтеграцію з існуючими системами, в тому числі геоінформаційними або муніципальними платформами.
3. Автоматизація рішень через правила. Система правил Rule Engine дозволяє реалізовувати адаптивну логіку реагування без ручного втручання, що важливо в разі перевищення екологічних нормативів.
4. Завдяки гнучким дашбордам дані можуть бути відкритими для населення, що підвищує екологічну обізнаність і довіру до муніципального управління.

Краудсорсинговий підхід до екологічного моніторингу передбачає активну участь мешканців міста у процесі збору даних про стан навколишнього середовища. Одним із сучасних рішень, що дозволяє реалізувати такий підхід, є використання компактних багатофункціональних сенсорних пристроїв, таких як Smart Citizen Kit [13] від Fab Lab Barcelona. Цей пристрій оснащений датчиками для вимірювання параметрів якості повітря (зокрема PM2.5, CO₂), температури, вологості, рівня шуму та освітленості. Він підключається до бездротової мережі (Wi-Fi) та здатен передавати телеметричні дані у форматі JSON на відповідну серверну платформу через протоколи MQTT або HTTP.



Property	Unit	Sensor
Air Temperature	Celsius	Sensirion SHT31
Relative Humidity	%rh	Sensirion SHT31
Noise Level	dBA	Invensense ICS-434342
Ambient Light	lux	Rohm BH1721FVC
Barometric Pressure	kPa	NXP MPL3115A26S
UV-A, UV-B, UV-C	μW/cm ²	AS7311
NOx Index, VOCs Index (Optional)	-	Sensirion SEN54, SEN55
Particulate Matter (PM1, PM2.5, PM4, PM10)	ug/m3	Sensirion SEN5X

Рисунок 1.6 - Smart Citizen Kit 2.3

Інтеграція таких пристроїв у платформу ThingsBoard здійснюється шляхом реєстрації їх як окремих віртуальних пристроїв (Devices) із прив'язкою до геолокації, що дозволяє відображати дані на інтерактивній карті разом з інформацією від інших міських сенсорів. Дані, отримані від громадянських сенсорів, виводяться на дашборди, які можуть бути персоналізованими або публічними. Це дає змогу мешканцям спостерігати за змінами в екологічній ситуації у своєму мікрорайоні та порівнювати їх з даними офіційних джерел.

Краудсорсинговий підхід забезпечує додаткове покриття "сліпих зон", тобто територій, де відсутні стаціонарні муніципальні сенсори, та сприяє підвищенню екологічної обізнаності населення. Громадський внесок у такий моніторинг не лише збагачує базу екологічних даних, але й створює додатковий механізм незалежного спостереження за станом довкілля. У випадку фіксації перевищення допустимих показників платформа може автоматично згенерувати попередження або сповіщення для інших користувачів. Такий підхід підсилює функціональність екологічної підсистеми «розумного міста» і дозволяє реалізувати принципи прозорості, залучення та сталого розвитку.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

2. РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ТА МОДЕЛІ ЗБОРУДАНИХ

2.1 Аналіз типових сценаріїв застосування системи

Таблиця відповідності типових сценаріїв використання екологічного моніторингу та компонентів платформи ThingsBoard, які реалізують ці функції:

Таблиця 2.1 - Компоненти платформи ThingsBoard

Сценарій використання	Компоненти ThingsBoard	Функціональне призначення
Air Quality Monitoring	IoT-сенсори PM2.5, CO ₂ → Gateway → MQTT → Device → Rule Engine → Alarm/Telemetry → Dashboard	Виявлення забруднення, візуалізація показників у реальному часі, автоматичні тривоги
Water Metering	Лічильники → Gateway → MQTT → Device → Timeseries DB → Dashboard	Віддалене зчитування показників споживання води, виявлення витоків
Smart Farming	Сенсори температури, вологості, освітлення → Device → Rule Engine → RPC / Actuator	Контроль мікроклімату, керування зрошенням та вентиляцією
Smart Irrigation	Вологоміри ґрунту → Device → Rule Engine → Команди керування → Актуатори	Автоматичне зрошення при недостатній вологості
Smart Metering	Електро- і газолічильники → Gateway → MQTT → Device → TimescaleDB → Dashboard	Централізований облік ресурсів, формування звітів, обмеження перевищення лімітів
Waste Management	Рівнеміри сміття в контейнерах → MQTT → Device → Rule Engine → Alert / Dashboard / External REST API	Побудова маршрутів збору сміття, уникнення переповнення, повідомлення диспетчерських служб
Environment Monitoring	Різномірні сенсори (шум, вологість, УФ, температура) → Gateway → Device → Dashboard + інтеграції з ГІС	Комплексна оцінка стану довкілля, об'єднання даних у єдину модель міського середовища

Пояснення до ключових компонентів:

– Device це віртуальне представлення фізичного сенсора прив'язане до профілю пристрою;

- «Rule Engine» модуль обробки даних та логіки реагування (тригери, маршрутизація, інтеграції);
- СУБД TimescaleDB для зберігання телеметрії з високою точністю часових міток;
- візуальний інтерфейс Dashboard для користувачів, операторів і мешканців міста;
- External API – REST або MQTT інтеграції з іншими муніципальними системами.

У галузі інтелектуального управління міським середовищем муніципалітети стикаються з потребою оперативного доступу до достовірної інформації про стан довкілля. Реалізація систем екологічного моніторингу на базі платформи ThingsBoard має відповідати таким ключовим запитам з боку міських служб.:

Оперативне виявлення екологічних загроз. Служби охорони довкілля повинні отримувати автоматичні сповіщення про перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин для своєчасного реагування та інформування населення.

Візуалізація ситуації в просторі та часі. Міські адміністрації потребують інтерактивних карт та аналітичних дашбордів, які відображають екологічну ситуацію по районах, вулицях чи окремих об'єктах, з можливістю ретроспективного перегляду динаміки.

Централізований моніторинг розподілених об'єктів. У реаліях урбанізованих територій контроль якості повітря, води, рівня шуму, рівня заповнення контейнерів тощо має здійснюватися з єдиного диспетчерського центру в автоматизованому режимі, без необхідності фізичного втручання.

Гнучкість прийняття управлінських рішень. Наявність структурованих даних дозволяє не лише реагувати на інциденти, а й моделювати сценарії розвитку ситуацій, оцінювати ефективність регуляторних заходів і приймати рішення на основі доказів (evidence-based policy).

Масштабованість та інтеграція з іншими підсистемами. Платформа має підтримувати поступове підключення нових типів сенсорів (водоміри, шумоміри,

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

детектори CO), а також обмін даними з існуючими підсистемами – транспортною, енергетичною, безпековою.

Публічність та екологічна просвіта населення. Муніципалітети зацікавлені у формуванні екологічної культури громадян, що передбачає відкритий доступ до частини екологічної інформації у вигляді публічних дашбордів та мобільних застосунків.

Опишемо варіанти використання для користувачів різних типів для визначення компонентів і конфігурації системи в цілому. Варіанти використання для користувача (ролі) «муніципалітет»:

- виявлення перевищення норм;
- перегляд карт забруднення та історичних даних;
- моніторинг розподілених об'єктів;
- формування управлінських рішень;
- масштабування та інтеграція з іншими платформами;
- надання публічного доступу до даних.

Актор «муніципалітет» це відділи екології, міські диспетчерські служби, комунальні підприємства.

Варіанти використання для ролі «мешканця міста»:

1. Перегляд екологічної інформації у своєму районі, тобто поточних показників якості повітря, температури, вологості, рівня шуму
2. Отримання автоматичних сповіщень про перевищення норм. Наприклад: тривоги при високому рівні PM2.5 або CO₂
3. Використання мобільного застосунку або веб-дашборду. Інтерактивна мапа з датчиками, графіки змін, вибір локації
4. Доступ до історичних даних для самостійного аналізу. Перегляд змін екологічної ситуації за день, тиждень, місяць.
5. Налаштування персоналізованих підписок лише по певному району або типу сенсорних даних.
6. Зворотній зв'язок або повідомлення про проблеми шум, аномалії, несанкціоновані викиди.
7. Перегляд офіційних екологічних повідомлень та рекомендацій. Вказівки

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щодо обмеження перебування на вулиці, вікритих вікон, використання масок.

2.2 Архітектура системи моніторингу на базі ThingsBoard

UML-діаграма екологічної підсистеми для платформи ThingsBoard, яка відображає типову архітектуру реалізації моніторингу екологічних параметрів у «розумному» місті з урахуванням компонентів і сервісів ThingsBoard.

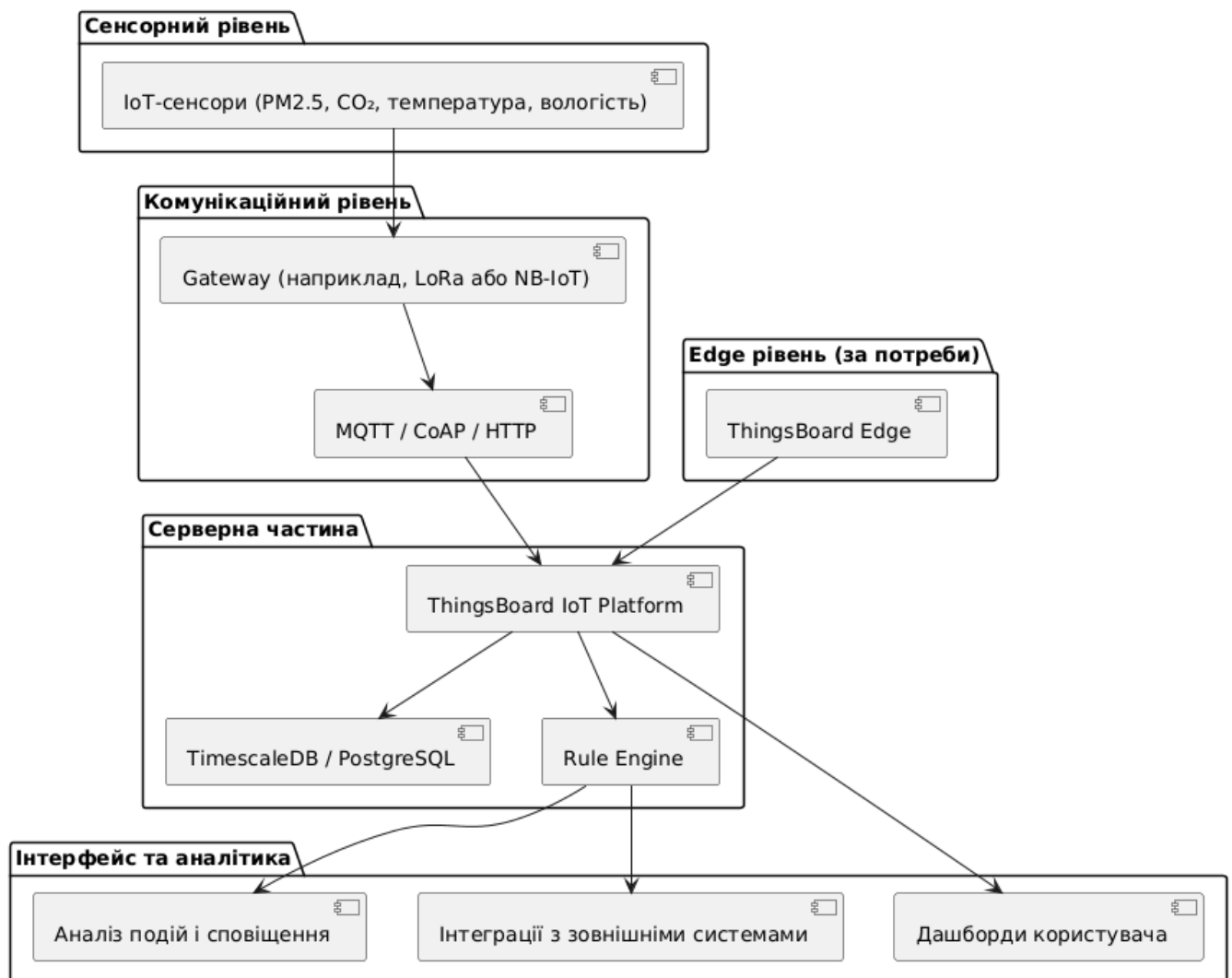


Рисунок 2.1 - Екологічна підсистема «розумного» міста на базі ThingsBoard

ThingsBoard IoT Platform — головний сервер обробки та зберігання телеметрії.

Rule Engine — гнучкий модуль обробки даних, який дозволяє налаштовувати тригери, конвертацію, маршрутизацію тощо.

Edge рівень — локальна інсталяція для збору та обробки даних безпосередньо біля сенсорів (офлайн або з періодичною синхронізацією).

TimescaleDB / PostgreSQL — використовується як СУБД з підтримкою часових рядів.

Інтеграції — можливість надсилання даних у зовнішні платформи (наприклад, через REST, Kafka, RabbitMQ).

Компонентна структура системи на базі платформи ThingsBoard, формується за багаторівневим принципом і включає апаратні та програмні елементи, кожен з яких виконує специфічну функцію у процесі збору, передачі, обробки та зберігання даних. Діаграма компонентів системи моніторингу екологічних параметрів зображена на кресленні КР.КІ.10660380.00.00.001.С1.

На першому рівні знаходяться сенсорні пристрої, які безпосередньо здійснюють вимірювання екологічних параметрів, таких як вміст шкідливих домішок у повітрі, рівень вуглекислого газу, температура, вологість або шумове забруднення. Ці пристрої можуть бути як стаціонарними, так і мобільними, встановленими у різних зонах міста.

Передача даних від сенсорів до серверної платформи відбувається через шлюзи — проміжні пристрої, які агрегують інформацію від локальної мережі сенсорів та передають її через мережу Інтернет з використанням протоколів MQTT, CoAP або HTTP. Шлюзи можуть підтримувати бездротові стандарти зв'язку, зокрема LoRaWAN або NB-IoT, що дозволяє використовувати систему в умовах обмеженої інфраструктури.

Ключову роль у маршрутизації повідомлень між сенсорами, платформою і користувачем відіграє брокер повідомлень. Зазвичай це MQTT-брокер, який забезпечує ефективну і масштабовану комунікацію між компонентами системи, дозволяючи керувати підписками на телеметрію, обробляти події в режимі реального часу та передавати команди на пристрої.

Збереження часових рядів і історичних даних у системі виконується за допомогою бази даних TimescaleDB, яка базується на PostgreSQL і оптимізована для високочастотної телеметрії. Вона забезпечує швидкий доступ до великого

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обсягу екологічної інформації з можливістю виконання складних аналітичних запитів та побудови звітів.

2.3 Моделювання збору екологічних даних

Розглянемо наукові публікації присвячені обчислювальним моделям розгортання IoT-систем екологічного моніторингу. Ці дослідження охоплюють архітектуру систем, використання машинного навчання, оптимізацію розміщення сенсорів та інтеграцію з хмарними технологіями. Робота [14] пропонує комбінований підхід до екологічного моніторингу, використовуючи бездротові сенсорні мережі (WSN) та мережі транспортних засобів (VANET) з обчисленнями на краю мережі. Модель дозволяє ефективно збирати та обробляти екологічні дані в реальному часі, що особливо корисно для моніторингу якості повітря на великих територіях.

У дослідженні [15] аналізуються сучасні системи екологічного моніторингу, які використовують IoT та сенсорні технології. Розглядаються різні архітектури систем, включаючи чотиришарову IoT-архітектуру, та застосування машинного навчання для обробки екологічних даних.

Стаття [16] описує досвід розробки та розгортання IoT-інфраструктури для моніторингу природного середовища. Розглядаються аспекти проектування системи, вибору сенсорів, збору та обробки даних, а також виклики, пов'язані з розгортанням у віддалених районах.

У дослідженні [17] розглядається використання недорогих IoT-сенсорів для моніторингу твердих частинок у повітрі. Аналізується ефективність щільного розгортання сенсорів для покращення просторово-часового розуміння забруднення повітря.

Отже, для реалізації екологічного моніторингу у ThingsBoard потрібно створити логічну модель, яка відображає пристрої (датчики), обробку даних, зберігання, сповіщення та візуалізацію. Нижче подано структурований перелік необхідних компонентів. Спочатку розглянемо таблицю 2.2 профілів пристроїв IoT-системи екологічного моніторингу, яка відображає характеристики типових

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сенсорних вузлів. Кожен рядок описує: назву профілю пристрою (тип сенсора або станції), типи переданих телеметричних даних, особливості налаштування кожного типу пристрою.

Таблиця 2.2 - Профілі

Назва профілю	Телеметрія	Особливості
Weather Station	temperature, humidity, pressure, windSpeed	Дані кожні 10 с, агрегування
Air Quality Sensor	pm1.0, pm2.5, pm10, co2, voc	Пороги для оповіщення
Soil Sensor	soilMoisture, soilTemperature	Використання на полях
Water Quality Sensor	pH, turbidity, tds, temperature	Застосування для річок, водойм
Noise Sensor	soundLevel, dBA	Можна додати геопозицію

Формати передачі даних: MQTT JSON, HTTP POST JSON, CoAP.

Таблиця 2.3 - Пристрої

Назва пристрою	Профіль	Location
WeatherStation_Kyiv	Weather Station	GPS
AirMonitor_School1	Air Quality Sensor	Локація школи
SoilNode_Field3	Soil Sensor	Геоточка в полі
RiverSensor_Seret	Water Quality Sensor	Координати річки
NoiseNode_ParkCentral	Noise Sensor	Місто

Для представлення фізичних місць, зон або організаційних одиниць (наприклад, регіони, будівлі, установи) використовуються логічні об'єкти Assets.

Приклад ієрархічної структури Assets:

- Region: Ternopil (верхній рівень);
- Location: Park Central (підрівень, що уточнює розміщення);
- Site: School #12 (конкретна локація або об'єкт моніторингу).

Такі об'єкти використовуються для групування пристроїв, що дозволяє:

- організовувати дані за територіальною ознакою,
- налаштовувати спільні дашборди й правила обробки подій,

- спрощувати адміністрування великої кількості сенсорів, прив'язуючи їх до відповідних локацій.

Таблиця 2.4 – Інтерактивні панелі

Назва Dashboard	Вміст
Air Quality Monitoring	Карта з кольоровими позначками, графіки PM2.5, CO2
Weather Overview	Температурний графік, шкала вологості, barometer
Soil Health Tracker	Індикація вологості, температури ґрунту, пороги
Water Monitoring	pH, мутність, карта водойм
Environmental Map	Інтерактивна карта з усіма пристроями

Приклад правил опрацювання подій та генерації сповіщень в таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Ланцюжки подій

Назва тригера	Умова	Дія
High CO2 Alert	co2 > 1000 ppm	Email, Telegram webhook
Low Humidity Alarm	humidity < 20%	SMS через Twilio
PH Critical	ph < 6 or ph > 9	Вивести повідомлення на карту
No data in 10 min	timeout по телеметрії	Запис в log + повідомлення

Розглянуті приклади інформації що використовується в екологічному моніторингу дозволяють побудувати обчислювальну модель, яка автоматично згенерує конфігураційні JSON-файли або створить компоненти системи через API. Архітектура такої обчислювальної моделі зображена на рисунку 2.2

Користувач надає інформацію про об'єкт моніторингу:

- тип об'єкта: school, factory, city_district
- локація: координати, район
- цілі моніторингу: air_quality, noise, water, waste
- обсяг: кількість пристроїв, покриття
- типи доступу: public, research, industrial

Компоненти моделі описані в таблиці 2.6

Таблиця 2.6 - Компоненти моделі генерації

Компонент	Опис
Інтерфейс введення	Форма або CLI для опису екологічного/інфраструктурного об'єкта
Модель онтології/шаблонів	Відповідність типу об'єкта типам сенсорів, профілів, алармів
Генератор структури	Побудова топології: профілі, пристрої, зв'язки

Генератор JSON / REST API	Експорт у JSON для імпорту або прямі запити до ThingsBoard API
Модуль візуалізації (опційно)	Побудова попереднього перегляду через Graphviz або Mermaid

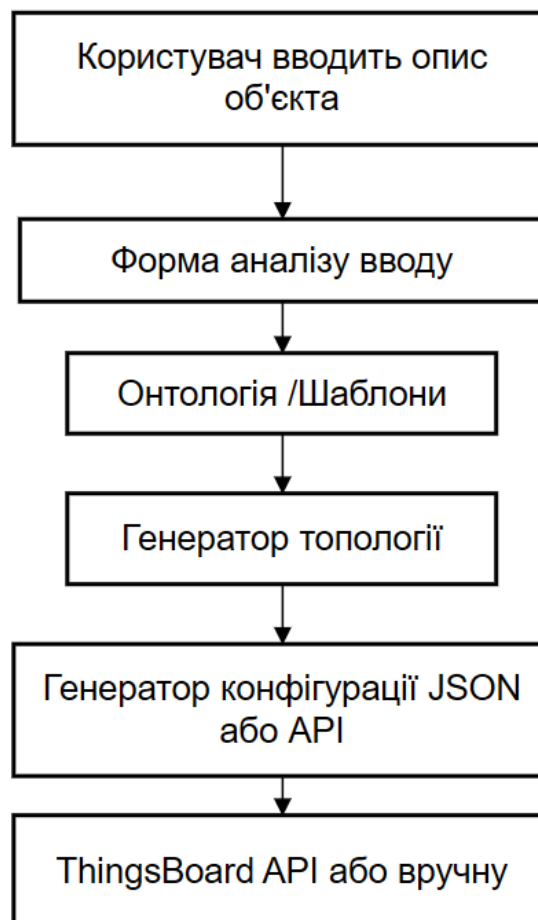


Рисунок 2.2 – Модель генерації конфігураційних файлів

Узагальнено проєктована модель повинна забезпечити створення структури системи моніторингу на основі параметрів користувача (рисунк 2.3).

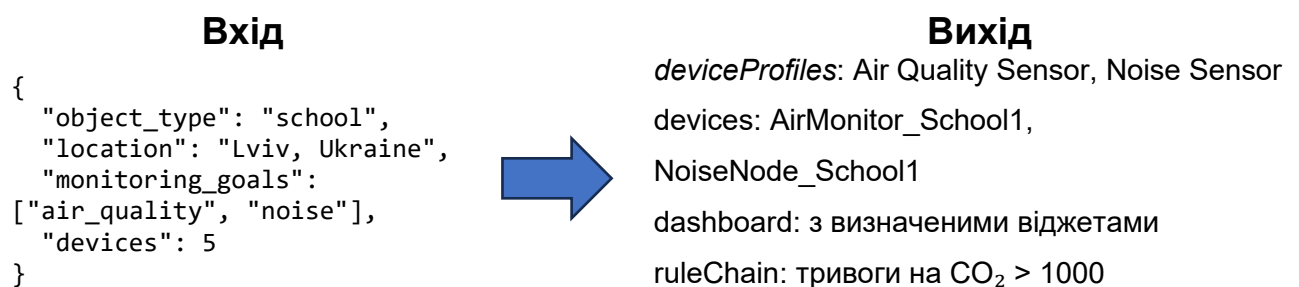


Рисунок 2.3 - Приклад сценарію використання моделі

Вхідні параметри системи задаємо вектором:

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$X = \{T, L, G, N, D\} \quad (2.1)$$

де T — тип об'єкта (наприклад, school, factory, city_district);
 L — координати або площа регіону (географічні характеристики);
 G — множина екологічних цілей моніторингу (air_quality, noise, water);
 N — щільність сенсорів (пристроїв) або площа покриття;
 D — тип доступу: public, private, research;

Вихідні параметри задаємо вектором:

$$Y = \{P, Dv, R, V\}, \quad (2.2)$$

де P — набір профілів пристроїв;
 Dv — перелік конкретних пристроїв із параметрами;
 R — логіка Rule Chains;
 V — Dashboard-схема.

Обчислення кількості пристроїв:

$$n_g = \left\lceil \frac{A \cdot k_g}{S} \right\rceil,$$

де A — площа об'єкта (км²);
 k_g — щільність сенсорів для цілі g (на км²);
 S — шкала розгортання (масштаб: від 0.1 до 1.0);
 n_g — кількість сенсорів для цілі g .

Приклад для щільності сенсорів параметр k_g :

- air_quality: 3–5 на км² (у місті);
- noise: 1–2 на км²;
- water_quality: 1 на водойму.

Формування профілів. Для кожної цілі $g \in G$ визначається набір телеметричних параметрів:

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_g = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}.$$

Наприклад:

- air_quality $\rightarrow$ pm2.5, co2, voc
- noise $\rightarrow$ soundLevel
- water $\rightarrow$ ph, turbidity

Вектор атрибутів пристроїв:

$$Dv_i = \{name_i, profile, location_i, metadata_i\},$$

де $location_i$ може бути згенеровано як рівномірно розміщені точки в радіусі або області.

Побудова Rule Chain якщо Для кожного $p \in P_g$, якщо задані порогові значення:

$$RC_p = \begin{cases} \text{generate_alarm}(p), & \text{якщо } p \text{ має порогове значення} \\ \emptyset, & \text{інакше} \end{cases}.$$

Далі, виходячи з профілю та кількості пристроїв, будуються шаблони інтерактивних панелей Dashboard:

- графіки: останні значення (latest telemetry);
- лінії часу (timeseries chart);
- мапа (map);
- індикатори (gauge, led).

Отже, узагальнена модель виглядає так

$$Y = F(X) = F(T, L, G, N, D),$$

де F — функціональний блок з модулями вибору профілів, модулем генерації топології, модулем формування конфігурацій.

Сформовано обчислювальну модель для автоматизованого проектування IoT-систем екологічного моніторингу. Модель враховує характеристики об'єкта спостереження, його географічне розташування, цілі моніторингу та параметри розгортання.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РЕАЛІЗАЦІЯ, РОЗГОРТАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

3.1 Розгортання програмної платформи

З метою забезпечення збору, візуалізації та аналітики даних екологічного моніторингу було розгорнуто платформу ThingsBoard на сервері під керуванням операційної системи Linux (Ubuntu Server 22.04 LTS). У процесі встановлення було використано офіційний дистрибутив ThingsBoard у вигляді .deb пакунку, а також налаштовано віртуальну машину Java та СУБД PostgreSQL як серверну складову. Команди для оновлення системи, встановлення Java 17, встановлення PostgreSQL і створення БД показано на рисунку 3.1.

```
sudo apt update && sudo apt upgrade -y
sudo apt install openjdk-17-jdk -y
sudo apt install postgresql -y
sudo -u postgres psql
```

Рисунок 3.1 – Команди встановлення системи і компонент

У середовищі PostgreSQL створити таблиці БД.

```
CREATE DATABASE thingsboard;
CREATE USER thingsboard WITH PASSWORD 'secure_password';
GRANT ALL PRIVILEGES ON DATABASE thingsboard TO thingsboard;
\q
```

Рисунок 3.2 – Створення таблиць

Завантаження та встановлення .deb пакунка ThingsBoard.

```
wget
https://github.com/thingsboard/thingsboard/releases/download/v4.0.1/
thingsboard-4.0.1.deb
sudo dpkg -i thingsboard-4.0.1.deb
```

Рисунок 3.3 – Створення таблиць

Перевірка і запуск сервісу.

```
sudo systemctl start thingsboard
sudo systemctl enable thingsboard
```

Рисунок 3.4 – Запуск веб сервісу

Для забезпечення обміну даними між сенсорними пристроями та платформою ThingsBoard було налаштовано протокол MQTT — легковаговий

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

брокерсько-клієнтський механізм, оптимізований для IoT-середовищ. Як брокер використано Mosquitto, популярне відкриття MQTT-рішення, що забезпечує передачу телеметрії з пристроїв до серверної платформи в режимі реального часу.

За замовчуванням Mosquitto запускається як фоновий сервіс на порту 1883 (незашифрований MQTT) і 8883 (з TLS, якщо налаштовано). Для безпечного підключення пристроїв, було створено власний конфігураційний файл `ecosensor.conf`:

```
listener 1883
allow_anonymous false
password_file /etc/mosquitto/passwd
persistence true
persistence_location /var/lib/mosquitto/
log_dest file /var/log/mosquitto/mosquitto.log
```

Рисунок 3.5 – Конфігураційний файл

ThingsBoard підтримує MQTT як вхідний транспорт. Для надсилання даних на платформу необхідно підключити пристрій до брокера з наступними параметрами (рисунок 3.6).

```
Host: ip-адреса-сервера
Port: 1883
Topic: vl/devices/me/telemetry
Username: access_token
```

Рисунок 3.6 –

Для тестування надішлемо JSON-дані у брокер команди

```
mosquitto_pub -h localhost -t vl/devices/me/telemetry -u
'T7x9sDFGkF1YpQaY' -m '{"temperature":25.7,"humidity":48}'
```

Рисунок 3.7 –

У результаті налаштування MQTT-брокера на основі Mosquitto забезпечено надійний механізм передачі екологічних даних від сенсорів до платформи ThingsBoard. Система підтримує автентифікацію, контроль доступу та масштабовану архітектуру для підключення великої кількості IoT-пристроїв.

Для зберігання великих обсягів телеметричних даних з екологічних сенсорів було обрано TimescaleDB — розширення до PostgreSQL, оптимізоване для роботи з часовими рядами. Завдяки підтримці автоматичного партиціювання

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(гіпертаблиць), стиснення даних та розширених запитів, TimescaleDB є ефективним рішенням для довготривалого зберігання IoT-даних.

Створення бази даних для екологічного моніторингу:

```
CREATE DATABASE eco_monitoring;
\c eco_monitoring
CREATE EXTENSION IF NOT EXISTS timescaledb;
\q
```

Рисунок 3.8 – Створення бази даних

Створення таблиці для зберігання телеметрії:

```
CREATE TABLE sensor_data (
  time TIMESTAMPTZ NOT NULL,
  device_id TEXT NOT NULL,
  temperature DOUBLE PRECISION,
  humidity DOUBLE PRECISION,
  pm25 DOUBLE PRECISION,
  location TEXT
);
```

Рисунок 3.9 – Створення таблиці даних сенсорів

Перетворення таблиці на гіпертаблицю, та тестування команд вставки та запиту в БД.

```
SELECT create_hypertable('sensor_data', 'time');
INSERT INTO sensor_data (time, device_id, temperature, humidity, pm25,
location)
VALUES (NOW(), 'sensor_1', 22.5, 45.3, 12.7, 'lab1');

SELECT * FROM sensor_data ORDER BY time DESC LIMIT 10;
```

Рисунок 3.10 – Перетворення таблиці на гіпертаблицю

Ініціалізація TimescaleDB дозволила створити продуктивне сховище для структурованих часових рядів, що надходять з сенсорів екологічного моніторингу.

3.2 Реєстрація пристроїв і конфігурація системи

На основі моделі з підрозділу 2.3 побудуємо алгоритм робить наступне:

- на вхід приймає опис об'єкта моніторингу (тип, локація, цілі),
- аналізує масштаб і типи вимірювань,

– на виході генерує JSON-файли для імпорту або API-запити для автоматичного створення системи

Метою даного етапу дослідження є розробка обчислювального алгоритму, який забезпечує автоматизоване формування конфігураційних файлів та об'єктів для екологічної підсистеми IoT-моніторингу на базі платформи ThingsBoard. Цей алгоритм має забезпечити перетворення вхідних параметрів, що характеризують об'єкт моніторингу, у відповідний набір профілів пристроїв, логіку обробки даних, віджети для дашбордів та структуру логічних зв'язків між компонентами системи.

У структурі завдання передбачається реалізація алгоритму, який приймає на вхід опис об'єкта моніторингу у вигляді векторної моделі параметрів (2.1). На основі цього опису система повинна згенерувати вихідний набір компонентів (2.2).

Для реалізації поставленого завдання доцільно використати сучасні інструменти програмування та обробки структурованих даних. Алгоритм може бути реалізований мовою Python, що забезпечує гнучкість при роботі з JSON-структурами та REST API платформи ThingsBoard. Бібліотеки `pydantic` [18] або `dataclasses` [19] можуть бути використані для визначення типів і валідації вхідних та вихідних структур. Для побудови топології пристроїв та генерації ієрархії об'єктів (Assets) рекомендується використання бібліотек для графів, таких як `networkx` [20], а для побудови візуалізації — `graphviz` [21] або `mermaid-js` [22] (через генерацію markdown-шаблонів).

Окрему увагу слід приділити модулю генерації логіки Rule Chains. Тут доцільно використати формальний опис умовних операторів, що відповідають пороговим значенням параметрів телеметрії. Формування таких умов може реалізовуватись через шаблонізатор, наприклад, `Jinja2` [23], або у вигляді спеціалізованої структури, що трансліюється у JSON для ThingsBoard Rule Engine.

Діаграма класів для програмного засобу що реалізує алгоритм генерації конфігурацій екологічного охоплює основні сутності: опис об'єкта моніторингу, генерацію профілів пристроїв, створення телеметричних правил, формування дашбордів і інтеграцію з ThingsBoard API (рисунок 3.11).

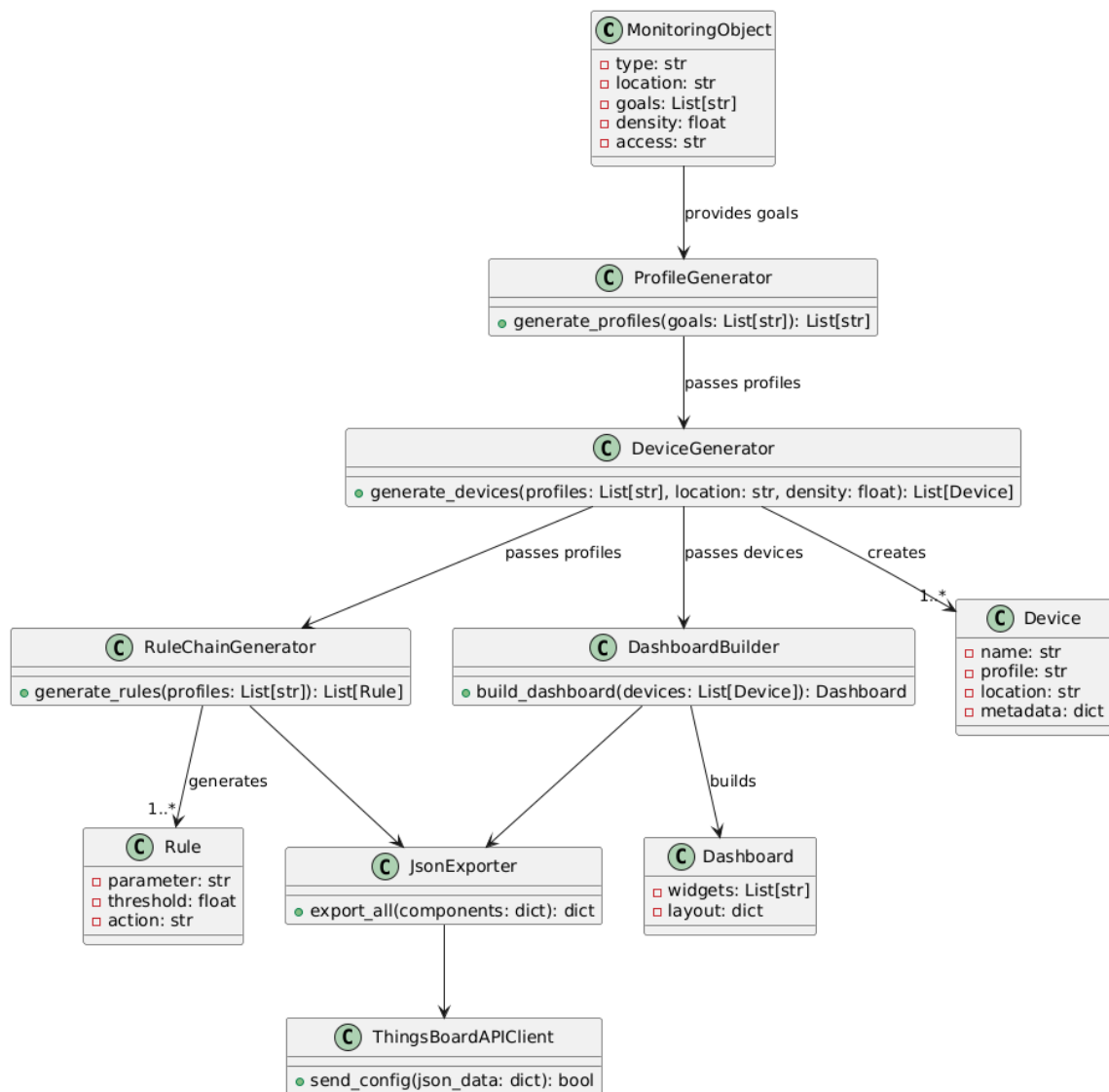


Рисунок 3.11 – Діаграма класів алгоритму генерації конфігурацій

Опис класів алгоритму генерації конфігурацій наведено в таблиці 3.1. Діаграма класів зображена на кресленні КР.КІ.10660380.00.00.002.С1.

Таблиця 3.1 - Опис класів

Клас	Опис
MonitoringObject	Представляє вхідні параметри від користувача: тип об'єкта, місце, цілі моніторингу, щільність, доступ.
ProfileGenerator	generate_profiles(goals) — визначає типи сенсорів для заданих екологічних цілей.
DeviceGenerator	generate_devices(profiles, location, density) — генерує конкретні пристрої з іменами, координатами, метаданими.
RuleChainGenerator	generate_rules(profiles) — формує правила для генерації сповіщень на основі порогів.
DashboardBuilder	build_dashboard(devices) — формує шаблон дашборду з виджетами для візуалізації телеметрії.

Продовження таблиці 3.1.

JsonExporter	export_all(components) — об'єднує всі частини моделі в єдину JSON-конфігурацію.
ThingsBoardAPIClient	send_config(json_data) — надсилає сформовану конфігурацію в ThingsBoard через REST API.
Device	Описує сенсорний вузол з назвою, профілем, геолокацією та допоміжними атрибутами.
Rule	Визначає умову спрацьовування (наприклад, перевищення CO ₂), поріг і дію.
Dashboard	Містить набір віджетів і логіку розміщення панелі для візуального інтерфейсу.

Приклад згенерованого JSON файлу для імпорту дашборду з map віджетом, сфокусованим (Додаток Б). Пояснення ключових частин:

"title": "Дашборд - Тернопіль на мапі": Назва вашого дашборду.
 "gridSettings": {"columns": 12}: Налаштування сітки дашборду.
 "stateLayouts": { ... }: Визначає різні стани дашборду. "default" - основний стан.
 "grid": {"widgets": [...]}: Масив віджетів на дашборді.
 "widget": { ... }: Опис окремого віджета.
 "type": "latest/map": Вказує, що це віджет типу "Map".

Код налаштування віджета.

"settings": { ... }: Основні налаштування віджета.
 "title": "Мапа Тернополя": Назва віджета.
 "currentMapProvider": "openstreetmaps": Використовується провайдер мап OpenStreetMap.
 "defaultZoomLevel": 13: Початковий рівень масштабування мапи.
 "defaultLatitude": 49.5535: Широта центру мапи.
 "defaultLongitude": 25.5948: Довгота центру мапи.
 "autocenter": false: Відключає автоматичне центрування, що дозволяє використовувати defaultLatitude та defaultLongitude.
 "config": { ... }: Додаткові налаштування конфігурації віджета, які також включають координати центру.

3.3 Тестування та оцінка ефективності платформи

У статті [11] наведено опис індикаторів екологічного стану міського середовища, що використовуються в рамках цифрового моніторингу. Зокрема,

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розглянуто індекс якості повітря (AQI) та індекс рівня шуму, які візуалізуються за допомогою колірного кодування на інтерактивній карті міста. Створимо за схожим принципом порогові значення [3] для умов обласних центрів України. Індекси якості наведено в таблицях нижче.

Таблиця 3.2 - Індекс якості повітря (AQI)

Діапазон AQI	Оцінка якості повітря	Потенційні зони міста	Колір
0–30	Відмінна	Парки, зелені зони	Темно-зелений
31–60	Добра	Спальні райони, окраїни	Зелений
61–100	Помірна (допустима)	Центр	Жовтий
101–150	Підвищене забруднення	Поблизу магістралей, автовокзал	Помаранчевий
151–200	Незадовільна	Індустріальні зони	Червоний
>200	Критичне забруднення	Поблизу котелень, застарілих підприємств	Темно-червоний

Таблиця 3.3 - Індекс шумового навантаження

Рівень шуму (дБА)	Стан акустичного середовища	Потенційні зони міста	Колір
< 50	Дуже тихо (нормальний фон)	Приватний сектор, парки	Синій
50–65	Середній рівень шуму	Житлові райони вночі	Зелений
66–75	Перевищення норми	Центр, ділянки з трафіком	Жовтий
76–85	Високе шумове навантаження	Площі з активним транспортом, ринки	Помаранчевий
>85	Шумове перевантаження	Вокзали, перехрестя без шумозахисту	Червоний

Ці індекси ми використаємо в системі для візуалізації в реальному часі та прийняття рішень щодо якості міського середовища. Колірне кодування дозволяє мешканцям швидко орієнтуватися в поточному стані повітря і шумового забруднення в їхній локації.

Тестування алгоритму генерації конфігурації для серверної системи екологічного моніторингу на базі ThingsBoard [24–33], із вхідними параметрами, коротким описом згенерованих JSON-конфігурацій. Вхідні параметри (вектор X):

```
{
  "object_type": "school",
  "location": "Ternopil, Ukraine",
  "monitoring_goals": ["air_quality", "noise"],
  "devices": 11,
  "access": "public"
}
```

Опишемо результати роботи алгоритму. Нижче показано JSON-конфігурацію профілів пристроїв (deviceProfiles.json)

```
[ {
  "name": "Air Quality Sensor",
  "telemetry": ["pm2.5", "pm10", "co2", "voc"],
  "alarmThresholds": {
    "co2": 1000,
    "pm2.5": 35
  }
},
{
  "name": "Noise Sensor",
  "telemetry": ["soundLevel", "dBA"],
  "alarmThresholds": {
    "soundLevel": 80
  }
}
]
```

Конфігурація JSON для створення пристроїв (devices.json)

```
[ { "name": "AirMonitor_School1",
  "profile": "Air Quality Sensor",
  "location": "49.8397, 24.0297",
  "metadata": {
    "site": "School #21",
    "region": "Ternopil"
  } },
{ "name": "NoiseNode_School1",
  "profile": "Noise Sensor",
  "location": "49.8399, 24.0301",
  "metadata": {
    "site": "School #21",
    "region": "Ternopil"
  } } ]
```

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конфігурація JSON для правил обробки подій (ruleChains.json)

```
[ { "parameter": "co2",
  "threshold": 1000,
  "action": "send_telegram"  },
  {
    "parameter": "soundLevel",
    "threshold": 80,
    "action": "show_popup"
  } ]
```

Конфігурація JSON для дашборду (dashboard.json)

```
{ "name": "School Air & Noise Monitoring",
  "widgets": [
    { "type": "timeseries", "source": "AirMonitor_School1",
    "parameters": ["pm2.5", "co2"]},
    { "type": "gauge", "source": "NoiseNode_School1", "parameters":
    ["soundLevel"]},
    { "type": "map", "sources": ["AirMonitor_School1",
    "NoiseNode_School1"]}
  ] }
```

Наведемо копії екрану створеної системи екологічного моніторингу. Сторінка "Device Profiles" показує профілі Air Quality Sensor і Noise Sensor з налаштованими параметрами.

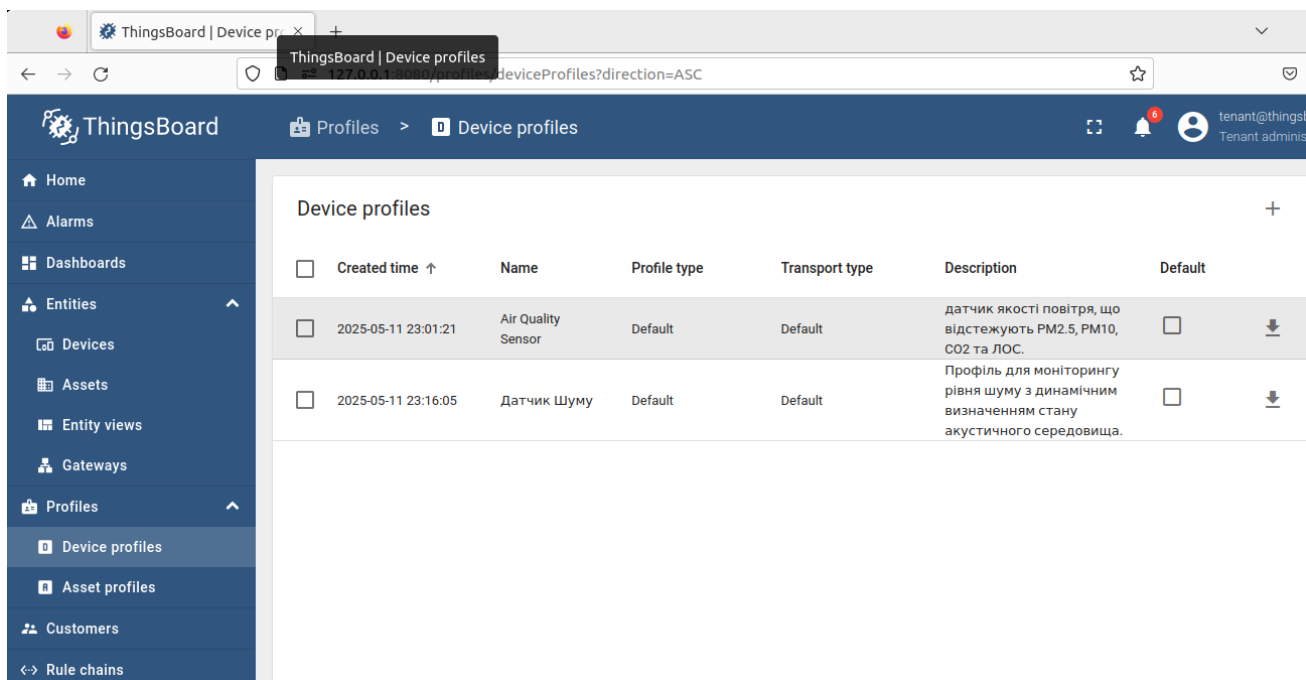


Рисунок 3.12 - Сторінка "Device Profiles"

Профіль датчиків якості повітря.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

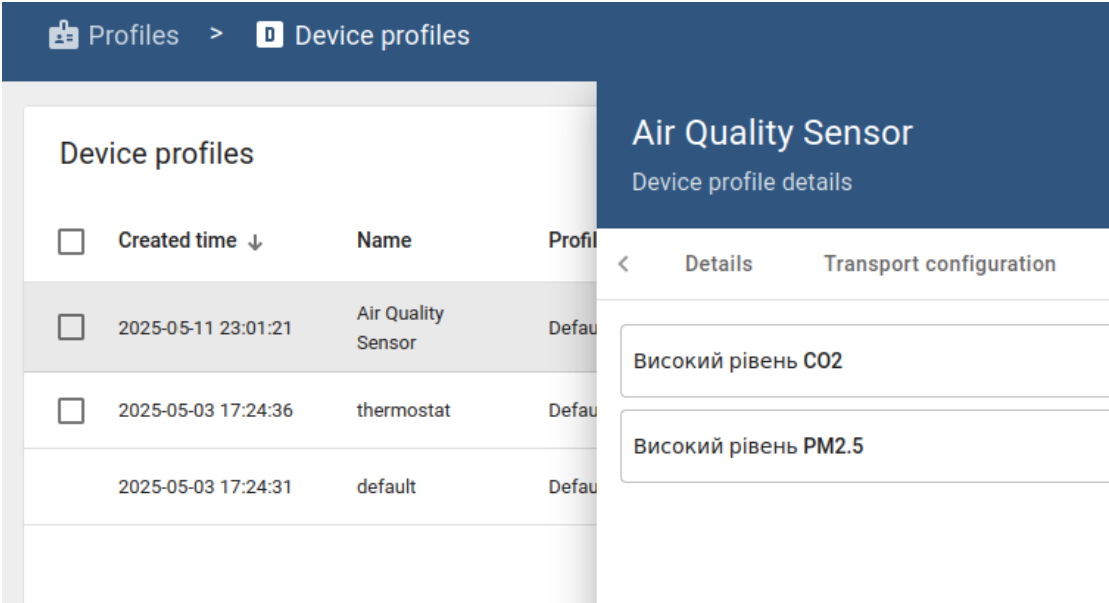


Рисунок 3.13 – Екран профіля для датчиків якості повітря

Профіль "Датчик Шуму" реалізує логіку за допомогою одного правила тривоги з різними рівнями серйозності. Коли рівень шуму змінюється, існуюча тривога буде оновлюватися, змінюючи свій рівень серйозності (Critical, Major, Warning, Minor) та опис, а не створюючи безліч окремих тривог.

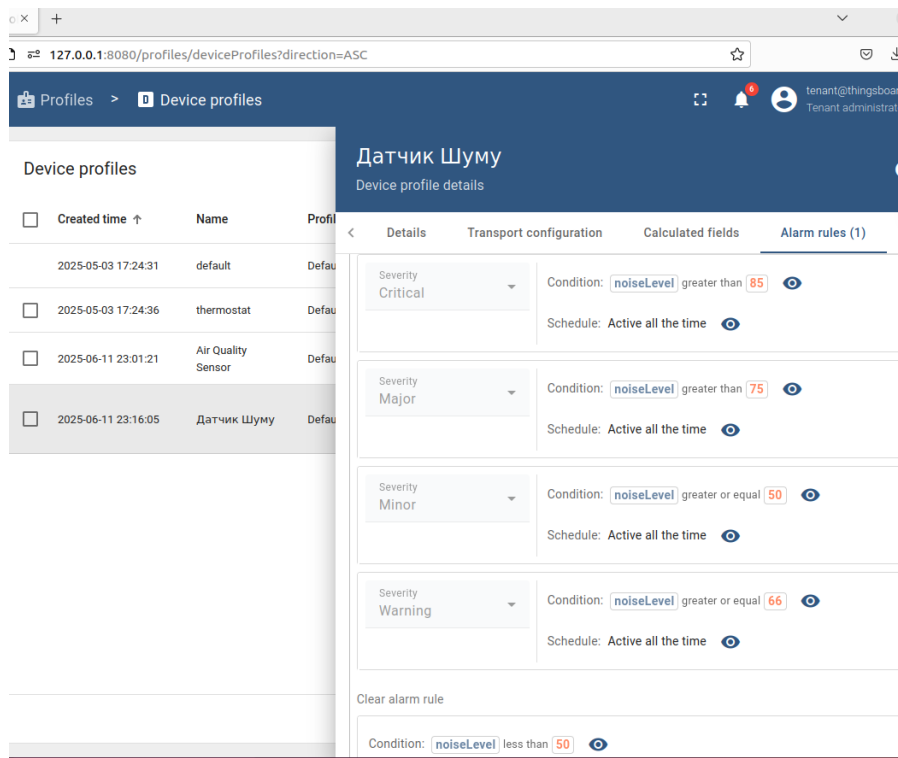


Рисунок 3.14 – Екран профіля для датчиків шуму

Сторінка "Devices" візуалізація створених пристроїв (рисунок 3.15).

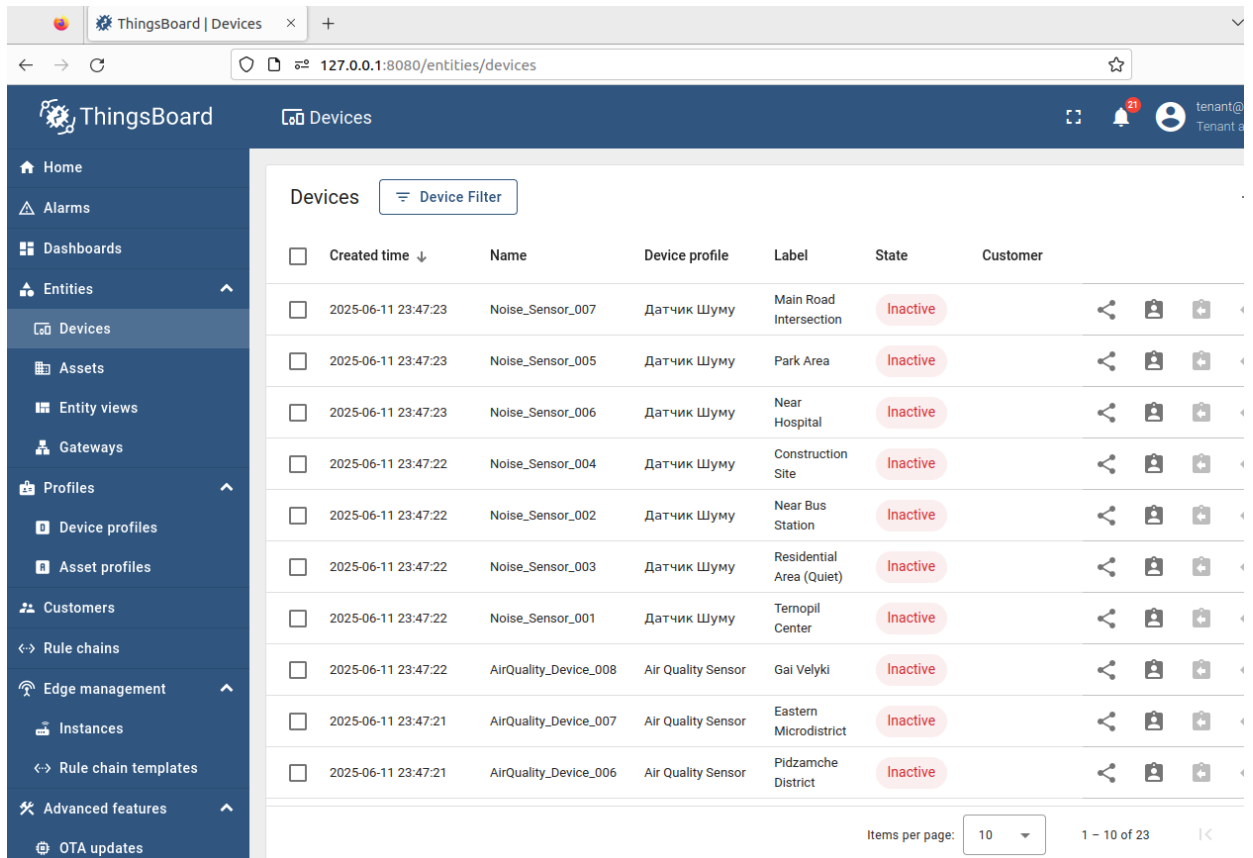


Рисунок 3.15 – Сторінка "Devices"

Створення сучасного та інформативного дашборда "Екологічний Моніторинг Міста" для мешканців.

Перелік віджетів:

Центральний елемент - інтерактивна карта "Maps" містить віджет "OpenStreetMap", який дозволяє не просто показувати датчики, але й забарвлювати їх іконки в залежності від рівня тривоги (зелений – норма, жовтий, помаранчевий, червоний – перевищення). Мешканець може одразу побачити, в яких районах міста ситуація є найгіршою.

Детальна інформація по датчику "Digital Gauges" дозволяє при натисканні на датчику на карті, іншим віджетам показувати детальну інформацію саме по ньому. Цифрові індикатори не просто показують цифру, а й заповнюються кольором, що відповідає рівню небезпеки, миттєво даючи зрозуміти, чи є показник "високим" чи "низьким".

Таблиця активних тривог "Alarms table" важлива для прозорості. Якщо датчик показує перевищення, цей віджет чітко відобразить, яка саме тривога активна, її серйозність та час виникнення.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

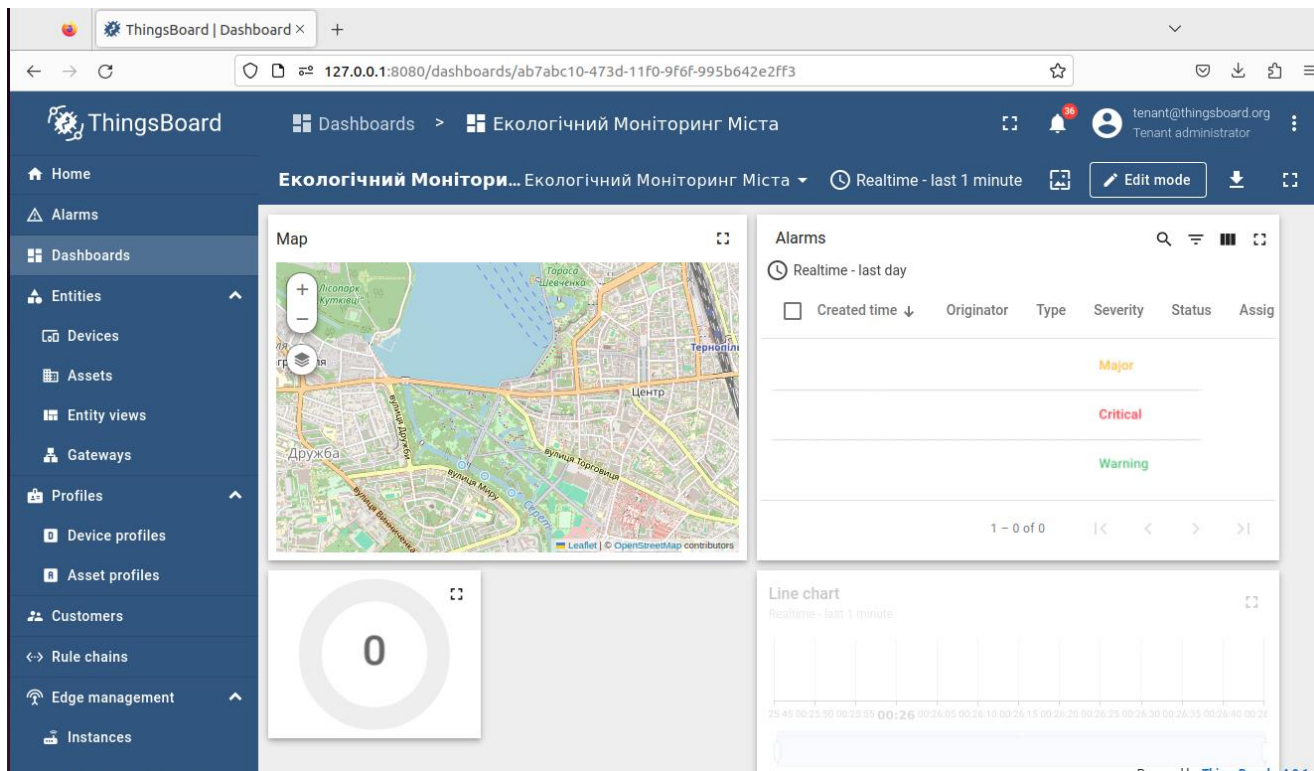


Рисунок 3.16 – Сторінка інтерактивної панелі системи моніторингу екологічних параметрів «розумного» міста

Панель історичні дані "Timeseries - Line Chart" дозволяє побачити динаміку показників за останню добу. Це відповідає на питання "чи стає краще/гірше?" і допомагає зрозуміти тренди.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

ВИСНОВКИ

При виконання кваліфікаційної роботи отримано наступні висновки.

1. Сучасні технології екологічного моніторингу базуються на використанні розподілених IoT-сенсорних мереж, хмарних платформ обробки даних та систем візуалізації, що забезпечують автоматизований, масштабований і достовірний контроль стану довкілля. Досліджено функціональні можливості екологічних підсистем у складі «розумного міста», зокрема на прикладі платформ Sentilo, Smart Citizen та ThingsBoard.

2. Проаналізовано типові сценарії застосування екологічної платформи та розроблено модель збору даних із сенсорів, що базується на ієрархії профілів пристроїв, телеметричних форматів та тригерів подій, що дозволяє гнучко структурувати екологічну інформацію.

3. Запропоновано архітектуру системи моніторингу на основі платформи ThingsBoard, яка поєднує пристрої, транспортні протоколи, бази даних, правила обробки та візуальні дашборди. Розроблено модель для автоматизованого проектування IoT-систем екологічного моніторингу що дозволяє генерувати конфігураційні компоненти системи — такі як профілі пристроїв, топологію розміщення сенсорів, логіку обробки подій та інтерактивні панелі візуалізації.

4. Розгорнуто середовище ThingsBoard, зареєстровано сенсорні пристрої, налаштовано обробку телеметрії та створено інтерактивні дашборди, користувач у зручній формі може відстежувати екологічні показники в реальному часі.

5. Виконано тестування платформи в умовах, наближених до експлуатаційних, із перевіркою коректності збору даних, візуалізації та реакції на перевищення порогових значень, що підтвердило працездатність системи та ефективність її компонентів.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волох В. В., Барановський В. О. Ієрархічна модель системи моніторингу в системі ThingsBoard. *II Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ весна 2025)*. (м. Тернопіль, . м. Тернопіль, С. 102–103.
2. OASIS. MQTT For Sensor Networks (MQTT-SN) Protocol Specification: Version 1.2. (2007). OASIS, 2007. URL: https://www.oasis-open.org/committees/download.php/66091/MQTT-SN_spec_v1.2.pdf 2007.
3. Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мокін В. Б. та ін. Моніторинг довкілля: підручник. ВНТУ. Вінниця, 2017. 232 с. Також доступний за посиланням: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/308/577/617-1>
4. Sentilo. URL: <https://www.sentilo.io/>
5. The Future of Internet of Things in Smart Cities - Barcelona Case Study. URL: https://angrynerds.co/blog/the-future-of-internet-of-things-in-smart-cities-barcelona-case-study/?utm_source=chatgpt.com (accessed 26/05/2025).
6. Smart Citizen – Fab Lab Barcelona | Research, education, innovation centre. URL: https://fablabbcn.org/projects/smart-citizen?utm_source=chatgpt.com (accessed 26/05/2025).
7. IoT & Communications/Security - Seoul Metropolitan Government. URL: <https://english.seoul.go.kr/policy/smart-city/iot-communications-security/> (accessed 26/05/2025).
8. Ecube Labs. *Wikipedia*. 23.02.2024. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ecube_Labs&oldid=1209808169 (дата звернення: 26.05.2025).
9. Smart Nation. *Wikipedia*. 23.02.2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_Nation (дата звернення: 26.05.2025).
10. Virtual Singapore - Singapore's virtual twin - Observatory of Public Sector Innovation. URL: https://oecd-opsi.org/innovations/virtual-twin-singapore/?utm_source=chatgpt.com (accessed 11/06/2025).

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

11. Manlio B., Franca D., Erina F. et al. Environmental Monitoring for Smart Cities. 2022. DOI:10.48550/ARXIV.2205.15147.
12. Метеопост - Що таке PM2.5 та PM10. URL: <https://meteopost.com/info/PM/> (accessed 11/06/2025).
13. Smart Citizen. (2025). URL: <https://smartcitizen.me/> 2025.
14. Mamalis B., Gerakidis S. A Combined Environmental Monitoring Framework based on WSN Clustering and VANET Edge Computation Offloading. 2024. DOI:10.48550/ARXIV.2411.10560.
15. Ranjan Laha S., Pattanayak B. K., Pattnaik S. Advancement of Environmental Monitoring System Using IoT and Sensor: A Comprehensive Analysis. *AIMS Environmental Science*. Vol. 9, Issue 6. P. 771–800. DOI:10.3934/environsci.2022044.
16. Nundloll V., Porter B., Blair G. S. та ін. The Design and Deployment of an End-To-End IoT Infrastructure for the Natural Environment. *Future Internet*. Вип. 11, № 6. С. 129. DOI:10.3390/fi11060129.
17. Reddy C. R., Mukku T., Dwivedi A. et al. Improving Spatio-Temporal Understanding of Particulate Matter using Low-Cost IoT Sensors. arXiv, 2020. DOI:10.48550/ARXIV.2005.05936.
18. Pydantic is the most widely used data validation library for Python. URL: <https://docs.pydantic.dev/latest/> (accessed 11/06/2025).
19. dataclasses — Data Classes — Python 3.13.4 documentation. URL: <https://docs.python.org/3/library/dataclasses.html> (accessed 11/06/2025).
20. NetworkX — NetworkX documentation. URL: <https://networkx.org/> (accessed 11/06/2025).
21. Graphviz. URL: <https://graphviz.org/> (accessed 11/06/2025).
22. Sveidqvist K., Contributors to Mermaid. Mermaid: Generate diagrams from markdown-like text. Generation of diagrams like flowcharts or sequence diagrams from text in a similar manner as markdown. URL: <https://github.com/mermaid-js/mermaid> (accessed 11/06/2025).2014.
23. Jinja2: A very fast and expressive template engine. : OS Independent.
24. Трубочанінова К. А., Жученко О. С., Лисечко В. П. Бездротові телекомунікаційні системи: навчальний посібник. Харків : УкрДУЗТ, 2022. 86 с.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

25. Гапак О. М., Балога С. І. Захист інформації в комп'ютерних системах: підручник. Ужгород : ПП «АУТДОР-ШАРК», 2021. 184 с.
26. Жураковський Б. Ю., Зенів І. О. Комп'ютерні мережі Частина 1: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 336 с.
27. Березький О. М., Мельник Г. М., Дубчак Л. О. та ін. Методичні вказівки до випускних кваліфікаційних робіт освітнього рівня “Бакалавр” спеціальності “Комп'ютерна інженерія”. ред. О. М. Березький. Тернопіль : ЗУНУ, 2024. 52 с.
28. Тарнавський Ю. А., Кузьменко І. М. Організація комп'ютерних мереж: підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 259 с.
29. Голь В. Д., Ірха М. С. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: навчальний посібник. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 250 с.
30. Bonaventure O. Computer Networking: Principles, Protocols and Practice. Saylor, 2022. 278 p.
31. Camisso J. Making Servers Work: A Practical Guide to Linux System Administration. DigitalOcean, 2020. 281 p.
32. The Cisco Learning Network. 2024. URL: <https://learningnetwork.cisco.com>
33. Eksim A. Wireless Communications and Networks - Recent Advances. InTech, 2012. 596 p.

					КР.КІ. 10660380.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50