НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

«На правах рукопису»
УДК 004.72:004.77:614.841.42

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____Марія СКУЛИШ
“___”_____2025 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
на тему: **Модифікована архітектура мережі інтернету речей для виявлення лісових пожеж**

Виконав: студент VI курсу, групи ЦІ-41мп

Юсин Іван Сергійович _____ _____
(підпис)

Науковий керівник: завідувач
кафедрою ІТТ НН ІТС, доктор технічних наук, професор
Скулиш Марія Анатолівна_____ _____
(підпис)

Науковий консультант: старший викладач
кафедри ІТТ НН ІТС
Курдеча Василь Васильович _____ _____
(підпис)

Рецензент: перший заступник директора
НН ІТС кандидат технічних наук
Авдєєнко Гліб Леонідович_____ _____
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2025

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

Рівень вищої освіти – другий магістерський за освітньо-професійною програмою Інформаційно-комунікаційні технології

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Марія СКУЛИШ
«___»_____2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Юсину Івану Сергійовичу

1. Тема роботи «Модифікована архітектура мережі інтернету речей для виявлення лісових пожеж», науковий керівник дисертації Скулиш Марія Анатолівна, завідувач кафедрою ІТТ НН ІТС, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025 р. №4772-с
2. Термін подання студентом дисертації 13 грудня 2025 р.
3. Об’єкт дослідження: Виявлення лісових пожеж
4. Предмет дослідження: Архітектура мережі інтернету речей для виявлення лісових пожеж
5. Перелік завдань:
    1. Проаналізувати можливості застосування Інтернету речей для систем моніторингу надзвичайних ситуацій.
    2. Дослідити особливості лісових пожеж.
    3. Проаналізувати базову систему мережі для виявлення надзвичайних ситуацій.

4. Модифікувати наявну структуру системи Інтернету речей для моніторингу лісових пожеж.
5. Обгрунтувати введені модифікації.
6. Оцінити запропоноване рішення.

6. Перелік ілюстративного матеріалу:
   1. Вступ, актуальність, мета
   2. Об'єкт та предмет дослідження
   3. Задачі дослідження
   4. Дослідження класифікації найпоширеніших надзвичайних ситуацій.
   5. Розгляд існуючих систем у даній галузі.
   6. Архітектура та структура запропонованої системи моніторингу.
   7. Оцінка характеристик даної системи.
   8. Загальні висновки.

7. Перелік публікацій
   1. Юсин І.С.. Курдеча В.В. Технології інтернету речей для виявлення надзвичайних ситуацій. // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій" ПТ-2024: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 304С.
   2. Юсин , І. С., & Курдеча , В. В. (2025). Система інтернету речей для виявлення надзвичайних ситуацій. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій», 354–356.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 2. Модифікована архітектура системи IoT для виявлення лісових пожеж	старший викладач кафедри ІТТ НН ІТС Курдеча В.В.		

РОЗДІЛ 3. Розрахунок ефективності запропонованої системи інтернету речей	старший викладач кафедри ІТТ ННІТС Курдеча В.В.		

9. Дата видачі завдання 28 жовтня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області та сучасних підходів до виявлення лісових пожеж	1.10.2025 – 20.10.2025	виконано
2	Огляд та порівняльний аналіз базової системи	20.10.2025 – 17.11.2025	виконано
3	Розроблення та модифікація архітектури системи моніторингу	17.11.2025 – 20.11.2025	виконано
4	Обґрунтування вибору апаратних та програмних компонентів системи	20.11.2025– 1.12.2025	виконано
5	Кількісна оцінка ефективності модифікованої системи	01.12.2025– 12.12.2025	виконано
6	Оформлення результатів дослідження та підготовка роботи до захисту	12.12.2025 – 13.12.2025	виконано

Студент _____ Іван ЮСИН
(підпис) (ім’я, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____ Марія СКУЛИШ
(підпис) (ім’я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Робота містить 91 сторінку тексту, 23 рисунки, 5 таблиць, використано 29 літературних джерел.

Актуальність роботи: У сучасних умовах зростає рівень загроз, пов'язаних із виникненням надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, зокрема пожеж, повеней, землетрусів та інших небезпечних явищ. Аналітичні звіти спеціалізованих служб і міжнародних організацій свідчать про тенденцію до збільшення як частоти, так і масштабів таких подій, що обумовлено комплексним впливом кліматичних змін, урбанізації, інтенсивного використання природних ресурсів та зростання техногенного навантаження.

Ефективне реагування на надзвичайні ситуації вимагає застосування сучасних інформаційних технологій, здатних забезпечити своєчасне виявлення загроз, оперативну обробку інформації та підтримку прийняття рішень. У цьому контексті особливої актуальності набуває використання технологій Інтернету речей (Internet of Things, IoT), які дозволяють інтегрувати розподілені сенсорні системи, пристрої спостереження та засоби збору даних у єдину інформаційну інфраструктуру. Застосування IoT-підходів створює передумови для безперервного моніторингу стану навколишнього середовища та аналізу даних у режимі реального часу, що є критично важливим для мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій та підвищення рівня безпеки суспільства.

Мета роботи: Підвищити імовірність виявлення та швидкість реагування на надзвичайні ситуації за рахунок застосування технології Інтернету речей.

Об'єкт дослідження: Виявлення Лісових пожеж

Предмет дослідження: Архітектура мережі інтернету речей для виявлення лісових пожеж

Наукова новизна: Запропоновано структуру системи реагування на надзвичайні ситуації , що відрізняється від існуючої застосуванням мережі Інтернету речей і дозволяє підвищити імовірність виявлення та швидкість реагування на надзвичайні ситуації

Практична цінність: впровадження запропонованого рішення може знизити шкоду від надзвичайних ситуацій за рахунок підвищення імовірності їх виявлення та зростання швидкості реагування на їх виникнення

Ключові слова: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, ПРИРОДНІ НЕБЕЗПЕКИ, ЛІСОВІ ПОЖЕЖІ, МОНІТОРИНГ.

ABSTRACT

The thesis consists of **91 pages**, **23 figures**, and **5 tables**. A total of **29 references** were used.

Relevance of the study: In modern conditions, the level of threats associated with natural and man-made emergencies, such as fires, floods, earthquakes, and other hazardous events, continues to increase. Analytical reports from specialized agencies and international organizations indicate a growing trend in both the frequency and scale of such incidents, driven by the combined effects of climate change, urbanization, intensive use of natural resources, and increasing technogenic pressure.

Effective response to emergency situations requires the application of modern information technologies capable of ensuring timely threat detection, rapid data processing, and decision support. In this context, the use of Internet of Things (IoT) technologies is of particular relevance, as they enable the integration of distributed sensor systems, monitoring devices, and data acquisition tools into a unified information infrastructure. The application of IoT-based approaches creates the conditions for continuous environmental monitoring and real-time data analysis, which is critical for minimizing the consequences of emergencies and enhancing public safety.

Objective of the Work: To increase the probability of detection and speed of response to emergencies through the use of IoT technology.

Research object: Detection of forest fires

Research subject: Architecture of the Internet of Things network for detecting forest fires

Scientific novelty: A structure of an emergency response system is proposed that differs from the existing one in its use of the Internet of Things network and allows for an increase in the probability of detection and speed of response to emergencies

Practical value: Implementation of the proposed solution can reduce the damage caused by emergencies by increasing the probability of their detection and the speed of response to their occurrence

Keywords: INTERNET OF THINGS, NATURAL HAZARDS, FOREST FIRES, MONITORING,

ЗМІСТ

ВСТУП

Актуальність теми: Надзвичайні ситуації, такі як пожежі, повені, землетруси та інші, постійно ставлять під загрозу безпеку та благополуччя нашого суспільства. Відповідно до звітів організацій з надзвичайних ситуацій, частота та інтенсивність цих подій зростають через різні фактори, включаючи зміни клімату, техногенні ризики та інші.

Подолання цих викликів потребує розробки та впровадження ефективних систем виявлення надзвичайних ситуацій, що дозволять оперативно реагувати на них та мінімізувати їхні наслідки. Одним із перспективних напрямків в цьому відношенні є використання технологій Інтернету речей (IoT), які дозволяють підключати різні сенсори, пристрої та системи моніторингу до мережі Інтернет з метою збору та аналізу даних в реальному часі.

У цьому вступному розділі ми детально розглянемо різні види надзвичайних ситуацій, що можуть виникати, а також оберемо одну з них для подальшого аналізу та дослідження. Крім того, ми розглянемо різні існуючі рішення для виявлення обраної проблеми та проаналізуємо їх недоліки та переваги

Мета роботи: Підвищити імовірність виявлення та швидкість реагування на надзвичайні ситуації за рахунок застосування технології Інтернету речей.

Об’єкт дослідження: Виявлення Лісових пожеж

Предмет дослідження**:** Архітектура мережі інтернету речей для виявлення лісових пожеж

Задачі на дану роботу:

- Дослідити особливості моніторингу лісових пожеж.
- Проаналізувати можливості застосування Інтернету речей для систем моніторингу лісових пожеж.
- Модифкувати архітекуру мережі Інтернету речей для моніторингу лісових пожеж
- Описати структуру та функції програмного забезпечення мережі інтернету речей моніторингу лісових пожеж
- Оцінити запропоноване рішення.

Наукова новизна: Запропоновано структуру системи реагування на надзвичайні ситуації , що відрізняється від існуючої застосуванням мережі Інтернету речей і дозволяє підвищити імовірність виявлення та швидкість реагування на надзвичайні ситуації

Практична цінність: впровадження запропонованого рішення може знизити шкоду від надзвичайних ситуацій за рахунок підвищення імовірності їх виявлення та зростання швидкості реагування на їх виникнення

Апробація: Підготовлено на опубліковано 1 тезу доповіді на науковій конференції.

Робота виконана в рамках НДР кафедри ІТТ НН ІТС за темою: "Технології Інтернету речей для розумного будинку та розумного міста" (0124U001559)

РОЗДІЛ 1

ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ ЯК НЕОБХІДНИЙ ЕЛЕМЕНТ У БОРОТЬБІ З ПРИРОДНИМИ НЕБЕЗПЕКАМИ

1.1 Особливості інтернету речей для систем моніторингу

Інтернет речей — одна з найпопулярніших наукових ідей сучасної інформатики, яка зараз активно втілюється в життя. Він здатний серйозно вплинути на розвиток сучасного суспільства, оскільки дасть змогу багатьом процесам відбуватися без участі людини. Інтернет речей (Internet of Things, скорочено IoT) — це глобальна мережа підключених до Інтернету речей — пристроїв, оснащених сенсорами, датчиками, засобами передавання сигналів.

Рис.1.1 Інтернет речей

Інтернет речей (IoT) зробив можливим збір, обробку та передачу даних майже в режимі реального часу за допомогою мережевих пристроїв та програмного забезпечення. Пристрої IoT використовуються для моніторингу та захисту біологічних та соціальних екосистем. Розгортаються датчики, що виявляють такі умови навколишнього середовища, як температура, тиск повітря, рівень вологості, а також параметри, включаючи радіацію, дим, CO2 та інші тверді частинки. Погодні характеристики місцевості є критично важливою інформацією, оскільки вони провокують займання пожежі та впливають на її ріст і поширення, тоді як виявлення тепла, диму та аномального рівня CO2

може свідчити про початок потенційної пожежі. Системи на основі IoT можуть надсилати сповіщення користувачам на передовій, таким як керівники пожежної охорони. Через часто низьку вартість та невеликий розмір пристроїв, багато датчиків можуть бути встановлені для покриття великих площ як у доступних, так і в важкодоступних місцях. Щоб витримувати високі температури та суворі погодні умови, датчики виготовляються з атмосферо- та теплозахисного матеріалу. Важкі метали використовуються для підвищення стійкості та довговічності цих сенсорних пристроїв. Єдиним недоліком є те, що атмосферні впливи можуть призвести до потрапляння цих металів у наше водопостачання та інші частини навколишнього середовища.

Для досягнення продуктивного моніторингу в лісовій зоні може знадобитися до 10 000 датчиків для досягнення належного покриття . Встановлення кластерів датчиків підвищує точність і надійність даних і мережевого зв'язку. Також можливо відстежувати закономірності в даних, такі як рухи та поширення диму або теплових аномалій. Багато датчиків Інтернету речей можуть живитися від батарей або сонячної енергії. Деякі датчики Інтернету речей з живленням від батарей можуть працювати повільніше через кілька років, що зрештою робить їх неефективними. Після розгортання датчики з розрядженими або несправними батареями, розташовані у віддалених районах, можуть бути важкодоступними.

Деякі системи на базі Інтернету речей дозволяють виявляти гарячі точки за допомогою кластера сенсорних вузлів, які потім запускають політ дрона для спостереження та збору додаткових даних у цій місцевості. Через підключені мережі інформація, зібрана датчиками, дронами та іншими системами виявлення, потім обробляється та передається в Інтернет або до центру обробки даних. Мережа передає дані про виявлення владі, а також іншим особам, підключеним до мережі, які потім можуть вживати заходів та приймати рішення щодо управління пожежами. (24)

1.1.2. Природні катастрофи і небезпеки

Природні катастрофи — один із найнебезпечніших факторів, що постійно загрожують людству. Землетруси, повені, урагани, лісові пожежі та інші стихійні явища мають значний вплив на життя людей, інфраструктуру та навколишнє середовище. Зростання урбанізації та чисельності населення лише посилює їхній потенційний вплив, розширюючи масштаби ризику.

Попри те, що природні катастрофи неможливо повністю передбачити, сучасні наукові та технічні досягнення створюють нові можливості для їх раннього виявлення та мінімізації наслідків. Одним із ключових напрямів є використання технологій Інтернету речей (IoT), що дозволяють формувати розподілені мережі датчиків і систем моніторингу. Такі системи здатні оперативно збирати дані про зміни в навколишньому середовищі, аналізувати їх у реальному часі та своєчасно сигналізувати про потенційні загрози.

Це особливо важливо для катастроф, що мають раптовий характер — наприклад, цунамі чи землетрусів, які можуть призвести до масштабних руйнувань та численних жертв. Трагічні події 2004 року в регіоні Індійського океану, коли внаслідок цунамі загинуло понад 230 тисяч людей [16], демонструють критичну необхідність розвитку систем попередження та швидкого реагування.

Таким чином, дослідження природних катастроф і впровадження IoT-технологій у системи моніторингу є важливими кроками для підвищення безпеки населення, зменшення збитків та забезпечення сталого розвитку територій.

Лісові пожежі є серйозним природним явищем, яке може спричинити значні руйнування екосистем та навколишнього середовища. Вони виникають внаслідок вогню, який поширюється в лісових масивах, зазвичай через сухість, сприятливі погодні умови та людську діяльність.

По всьому світу за останні кілька років почастішали і набули масштабу катастрофи лісові пожежі. За останні дев’ять років в Україні, за кількістю випадків спалаху лісу лідирує 2017 рік – 2 тисячі 371 випадок, загалом площа

пожеж склала 5,5 тисячі гектарів. Щороку лісові пожежі забирають кілька тисяч гектарів лісу, людські життя та погіршують загальну екологічну ситуацію.

Ліси – одна з найважливіших екосистем, від якої залежить підтримка клімату планети та збереження стабільного біорізноманіття світу. Вони приносять користь для здоров'я кожної людини: чисту атмосферу, воду, культурні та природозберігаючі заповідники, крім того життя для тварин і рослин . Це найдосконаліший природний комплекс, який формувався протягом століть, і який має загрозу зникнути протягом наступних поколінь.

Рис. 1.2 - Масштабна лісова пожежа

Від лісів залежить, так чи інакше, усе наше комфортне проживання на планеті. Вони покривають одну третю всієї суші планети, дають притулок майже 80% наземного біорізноманіття світу, на їхніх територіях знаходяться понад 60 000 видів дерев, які забезпечують людей киснем (20% усього кисню виробляється в лісах Амазонки), а тварин – проживанням. Тубільні народи, які живуть в лісовій зоні, зазвичай споживають понад 100 видів харчових продуктів дикої лісової природи. Ліси забезпечують екологічно корисну зайнятість понад 86 мільйонам людей і є джерелом засобів для існування. Саме ліси запобігають ерозії ґрунту та пом'якшують зміни клімату. У розвинених країнах до 25% всіх лікарських препаратів є препаратами рослинного походження, а в країнах, що

розвиваються, їх частка досягає 80%. Їжа, пальне та матеріали для будівництва для 1 мільярда людей – також неможливі без зеленої екосистеми.

Лісова пожежа являє собою стихійне поширення вогню ділянками лісового фонду. За площею пожежі поділяються на:

- невеликі (до 5 гектарів);
- великі (від 5 до 200 гектарів);
- особливо великі (понад 200 гектарів).

Рис. 1.3 Верхова пожежа

Існує три основних типи лісових пожеж: верхова, низова і підземна. Верхові пожежі – найбільш інтенсивні і небезпечні з температурою горіння від 900 °С до 1200 °С. Під час пожеж такого типу згорають сухі та дрібні гілки, крім того обгоряють, кора дерев обвуглюється.

За швидкістю поширення вони поділяються на:

– «рухливі», які поширюються кронами дерев із швидкістю більше 4 кілометрів на годину, значно випереджаючи фронт низових пожеж, та спричиняють утворення нових осередків завдяки рознесенню іскор;

Такі пожежі є небезпечними через сильну горючість деревини. Тому що при швидкості поширення вогню 3м/хв та умовно сприятливих зовнішніх умов, уже через 2 години після виявлення пожежі, її площа може зрости у 10 разів, а периметр у 1,2 раза. А враховую що сьогодні, в середньому від моменту виявлення пожежі до початку її локалізації може пройти до 6 годин, то з такими темпами пожежа перетвориться у масштабну екологічну катастрофу. Саме тому існує нагальна потреба у створенні більш швидкої системи реагування, яка зможе

виявляти пожежі на ранній стадії, та вчасно передавати повідомлення про них у відповідні служби.

Рис. 1.4 Рухлива пожежа

– «стійкі», які поширюються із швидкістю до 4 кілометрів на годину кронами дерев одночасно з просуванням фронту стійкої низової пожежі.

Верхові лісові пожежі за параметрами просування фронтальної крайки лісової пожежі поділяються на слабкі (до 3 метрів на хвилину), середньої (від 3 до 100 метрів на хвилину) сили та сильні (100 метрів на хвилину).

Під час низової пожежі згоряє лісова підстилка, лишайники, мох, трави, опале на землю листя та гілля. Швидкість поширення пожежі за вітром – 0,25–5 км/год. Висота полум’я – до 2,5 м. Температура горіння – близько 700 °С (іноді вище).

Низові пожежі за швидкістю руху фронтальної крайки поділяються на:

– слабкі (до 1 метра на хвилину і висотою полум’я до 0,5 метра).

– середньої сили (від 1 до 3 метрів на хвилину і висотою полум’я від 0,5 до 1,5 метра).

– сильні (більше ніж 3 метри на хвилину і висотою полум’я більше ніж 1,5 метра).

Підземні загоряння відбуваються в глибоких скупченнях гумусу, торфу і аналогічної мертвої рослинності, які стають досить сухими, щоб горіти. Ці пожежі поширюються дуже повільно, але часом є найскладнішими при

гасінні.[4] Під час тривалої посухи, вони можуть тліти всю зиму під землею, а потім знову з’являтися на поверхні навесні. До цього типу відносять торф’яні пожежі, які виникають у місцях залягання торфу. Під час проникнення вогню в глибину торф’яного шару відбувається загоряння нижніх його шарів. Швидкість поширення такої пожежі – кілька метрів на добу.

Також до лісових пожеж відносяться плямисті пожежі, які утворюються поза контуром основної пожежі від іскор, які переносяться вітром та конвективними потоками з території пожежі.

Основні чинники, які спричиняють лісові пожежі антропогенного характеру, визначають стан і динаміку природно-господарських об’єктів. Ці чинники включають такі як недбалість у справах пожежної безпеки, зокрема розведення відкритого вогню, непогашені залишки багаття, кинутий недопалок або палаючий сірник, спалювання листя і сміття поблизу дерев або на торфовищах, викид матеріалу, який насичений горючими речовинами, сфокусовані осколками скла сонячні промені, а також навмисний підпал, який становить близько 30% випадків, та використання несправної техніки під час господарських робіт у лісі. Також варто враховувати природні фактори, хоча вони складають невеликий відсоток виникнення лісових пожеж. Ці фактори включають кліматичні умови, влучання блискавки (частіше під удар блискавки потрапляють дерева, що ростуть на височинах) та вулканічну діяльність. [7]

Ось список можливих причин виникнення лісових пожеж:

1. Недбале поводження з вогнем: це може бути навмисний підпал, використання відкритого вогню без дотримання правил безпеки, незадовільне погашення кострища або запалення вогню для очищення території.

2. Помилки під час проведення лісових робіт: неправильне відведення та регулювання димових каналів, несправне обладнання, неправильна рубка або заготівля деревини.

3. Природні причини: блискавка може викликати пожежу без вини людини; також сильний вітер може переносити вогонь, який раніше був запалений на відкритій місцевості.

4. Невірне використання природних ресурсів: відкритий вогонь або іскри, що виникають від роботи машин та обладнання, можуть викликати лісову пожежу.

5. Переповнення звалищ сміття: звалища можуть стати джерелом запалення, якщо на них викидають вогненепроникні матеріали.

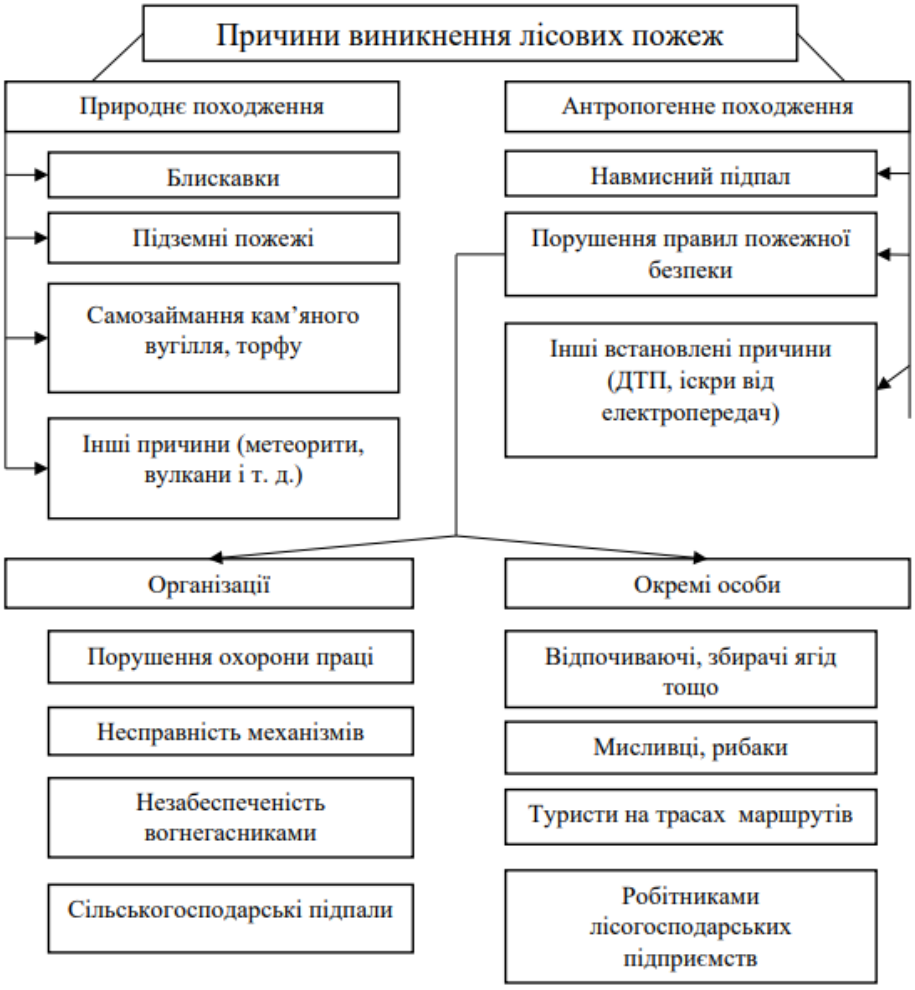

Рис. 1.5 причини виникнення лісових пожеж

Усі ці пожежі призводять до великих шкод, не тільки для природи та життя людей і тварин, так само і державам, завдаючи великих збитків. З таблиці 1.1 можна приблизно оцінити кількість лісових пожеж і отримані збитки лише на території України. [8] Також з таблиці можна зробити висновки що площа не прямо пропорційна кількості пожеж. Тому що як ми уже зрозуміли навіть одна пожежа, проти якої не було вчасно виконано необхідних заходів, може стати катастрофою.

Таблиця 1.1 Статистика лісових пожеж

Рік	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Кількість Лісових пожеж	3240	2526	2163	1113	2003	3813	1249
Площа пожежі, га	3668	1049	3479	418	13778	14691	1249
Збитки, тис. грн	26728,4	3215,9	56062,7	1376,2	51701,8	20164,5	8619

Отже, розглянувши особливості виникнення лісових пожеж, їх типи та рівні їх небезпеки, можна сформулювати необхідні критерії, на основі яких я буду розробляти систему для моніторингу і виявлення лісових пожеж.

Отже наступні критерії будуть такими:

- Система повинна забезпечувати максимальне покриття території для моніторингу лісових масивів.
- забезпечувати оперативну передачу даних з місця пожежі до центру обробки інформації.
- мати високу точність виявлення пожеж, мінімізуючи кількість хибних спрацьовувань.
- Витрачати мінімальний час виявлення пожежі від моменту її виникнення до передачі інформації для подальшого реагування.

Виконання цих критеріїв допоможе зробити ефективну систему для моніторингу за лісовими масивами та виявлення пожеж вчасно, що допоможе зменшити шкоду та збитки від лісових пожеж.

1.1.3 Моніторинг лісів. Розгляд існуючих рішень

Дивлячись на усю вище згадану інформацію. Одразу постає питання чи можна якось із цим боротися? Чи можна якось уникнути лісових пожеж, або хоч не дати їм набути великих масштабів? Способи моніторингу вогнищ лісових пожеж. Пожежі можуть завдати колосальних збитків природі, тому, щоб уникнути їх наслідків, здійснюють моніторинг лісових пожеж. Способи різні: є

перевірені часом візуальні огляди, також практикують спостереження за допомогою супутників і сучасної техніки. Ефективно використовувати способу моніторингу лісових пожеж у комплексі. У багатьох країнах діють профільні служби та установи зі збирання, аналізу і структурування даних для подальшого узагальнення. Розглянемо існуючі види та типи моніторингу пожеж. Серед найефективніших є: Супутниковий моніторинг, Система відеоспостереження, Системи інших датчиків (температури, диму та ін.), Дрони і БПЛА літакового типу, та штучний інтелект. Усі вище перераховані є ефективними і корисними засобами у виявленні пожеж. Які є ефективними на різних площах і розмірах лісу.

Системи наземних камер (візуальні та інфрачервоні датчики)

У багатьох регіонах для активного обстеження ландшафту на предмет нових пожеж впроваджено наземні системи камер. Вони оснащені датчиками ближнього інфрачервоного та/або теплового діапазонів, які дозволяють їм отримувати інформацію про об'єкти, видимі здалеку. Оптичні камери пропонують як монохромну, так і кольорову інформацію через зображення. Візуальні датчики можуть надавати кольорову інформацію, фіксуючи червоне, синє та зелене світло . Таким чином, наявність диму або вогню легко спостерігається в денний час.

Використання лише візуальних датчиків недостатньо для виявлення пожеж у складних умовах освітлення або вночі, дим може залишитися непоміченим, оскільки зменшується видимість кольорів. Це заважає виявленню кольорів і не може попередити рятувальників про нові пожежі. Перевага встановлення інфрачервоних датчиків у цих місцях полягає в...

Системи камер – це можливість отримувати теплову інформацію про випромінюване тепло від об'єктів, що знаходяться в полі зору. Поєднання інфрачервоних датчиків з візуальними зменшує рівень хибних спрацьовувань при виявленні пожежі та призводить до підвищення надійності систем камер для виявлення лісових пожеж. Камери як рішення для раннього виявлення лісових пожеж є найзрілішою та найвпровадженішою технологією. Також доступні

функції оптичного масштабування, які надають пожежникам можливість отримувати додаткову ситуаційну інформацію. Системи візуальних камер здатні виявляти лісові пожежі на відстані до 60 км за гарних погодних умов. Оптимальна відстань для виявлення невеликих лісових пожеж на ранній стадії становить 15 км. Завдяки лінії видимості та LWIR (довгохвильовому інфрачервоному випромінюванню) тепловізійні камери виявляють пожежі площею 2 м² на відстані 5 км, а також палаючі поверхні площею 9 м² на відстані 8 км.

Серед компаній, які розробили та впровадили системи виявлення лісових пожеж на основі камер, є Robotics Cats , EnviroVision Solutions , IQ Firewatch та Pano AI . Існує нова категорія програмних рішень, що підтримують встановлені мережі камер, такі як AlertWildfire та HPWREN, які надають відео в режимі реального часу рятувальникам та іншим членам громадськості. (24)

Супутниковий моніторинг

Хоча більшість супутників були розроблені переважно для цілей, відмінних від виявлення пожеж, здатність супутників охоплювати великі регіони робить їх найбільш корисними для масштабного моніторингу та можливого виявлення пожеж у віддалених районах. Вони використовувалися для управління пожежами, щоб виявляти активні пожежі та гарячі точки, а також для відстеження руху диму. Геостаціонарні супутники, розташовані на висоті 35 785 км, закріплені над екватором Землі. Рухаючись зі швидкістю, що дорівнює швидкості Землі, ці супутники забезпечують постійний огляд однієї й тієї ж великої площі. Кожні 15 хвилин вони безперервно створюють грубі зображення вогню, диму та хмар з низькою роздільною здатністю. На противагу цьому, супутники на полярній орбіті, а саме Terra та Aqua NASA, здатні створювати дуже детальні зображення енергетичного випромінювання разом із властивостями диму та аерозолю , що належить до явища пожежі.

На борту геостаціонарних та полярних орбітальних супутників може бути будь-який із цих 3 типів датчиків: VIIRS, MODIS та AVHRR. Усі вони надають дані зображень диму, гарячих точок та вогню. Датчик VIIRS широко

використовується для виявлення лісових пожеж, оскільки він збирає дані як у видимому, так і в інфрачервоному світлі (Barmpoutis et al., 2020). Цей датчик також може картографувати периметри пожежі та створювати зображення з роздільною здатністю 375 м та 750 м на піксель . Зображення з роздільною здатністю 375 м є більш детальними, ніж ті, що отримані на висоті 750 м. Такі відмінності в просторовій роздільній здатності впливають на ступінь поширення вогню, що відображається на отриманих зображеннях. Супутники Terra та Aqua оснащені датчиками MODIS, які охоплюватимуть всю земну кулю кожні 1-2 дні . Вони збирають ще більше атмосферних даних, ніж VIIRS, включаючи виявлення ширшого діапазону інфрачервоного світла . Видимі зображення корисні для виявлення будь-якого чіткого диму та гарячих точок серед білого дня, але вони неефективні вночі або за погодних умов, коли видимість низька. Це створює труднощі, оскільки дані про дим можуть бути схожими на дані інших явищ, а саме хмар та серпанку. MODIS оснащений тепловими детекторами, які шукають аномальні температури на поверхні Землі. Для гарячих точок та інших джерел тепла точне розташування оцінюється, але ніколи не є остаточним. Датчики AVHRR, що підтримуються полярно-орбітальними супутниковими приладами NOAA, створюють зображення з роздільною здатністю 1 км . Подібно до роздільної здатності 700 м, просторова роздільна здатність такого розміру не забезпечує достатньої деталізації, щоб виявити пожежі на ранніх стадіях займання.

Протягом 3 годин після спостереження за осередками пожеж та пожежами, служби швидкого реагування та землекористувачі отримують сповіщення про активні пожежі, але бувають випадки, коли зображення стають доступними лише через 4-5 годин після виявлення . Хоча багато з цих супутникових моделей використовувалися для прогнозування спалахів пожеж та їх відстеження, багато супутників з тривалим часом повторного захоплення даних стають менш застосовними до нових безпрецедентних пожеж, які спалахують частіше та зростають швидшими темпами.

Оскільки супутники продовжують розвиватися та вдосконалювати свої можливості, їхні розміри зменшуються, що спрощує їх розгортання та знижує вартість запуску. Вони стають більш придатними для виявлення лісових пожеж на великих відстанях та моніторять поверхню Землі з більшою роздільною здатністю. Також впроваджуються розробки для покращення їхньої затримки. Компанії, що розгортають супутникові прилади для пом'якшення наслідків лісових та лісових пожеж, - це Ororatech та Excі .

Моніторинг з допомогою дронів та БПЛА.

Ще одним продуктом, що впроваджується для сприяння боротьбі з пожежами, є безпілотні автоматизовані транспортні засоби (БПЛА). Вони використовуються як альтернатива літальних апаратам з екіпажем для подолання труднощів зі спостереженням та гасінням пожеж в умовах низької видимості . Подібно до наземних систем камер, дрони можуть бути оснащені інфрачервоними та оптичними датчиками для виявлення активних пожеж та гарячих точок, які можуть бути приховані димом.

Рис. 1.6 Моніторинг з використанням дрона

Існує два типи дронів: з гвинтокрилими та з фіксованими крилами, обидва типи легко розгортаються. Ротори, що обертаються на високій швидкості, дозволяють автоматизованому апарату зависати на місці годинами, деякі – 3 години, а деякі – понад 8. Дрони з гвинтокрилими літальами мають меншу витривалість, тому вони здатні спостерігати та оглядати ландшафт протягом коротшого періоду часу, ніж дрони з фіксованим крилом, час польоту яких може

становити до 16 годин . Хоча дрони з фіксованим крилом розроблені для подолання відстаней на вищих швидкостях та тривалого часу польоту, дрони з гвинтокрилими літальами є більш поширеними через свою маневреність, але для деяких їхній час польоту обмежений, оскільки він становить лише до 30 хвилин . Недоліком є те, що деякі дрони з гвинтокрилими літаками мають невелике корисне навантаження , що може зробити їх непридатними для підтримки важких тепловізійних та візуальних камер або інших датчиків. Завдяки своїм маневреним можливостям та швидкій зміні напрямку, дрони здатні охоплювати великі площі ландшафту.

Спостереження за пожежами у віддалених та важкодоступних районах стало можливим завдяки розгортанню безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Вони здатні літати вгору та вниз по місцевості, проводячи спостереження в районах з крутими схилами, але навігація по місцевості з великими перепадами висот або тій, що вкрита густою рослинністю, може бути складною для спостереження (Hristov et al., 2019). Окрім використання дронів для ретельного огляду територій та виявлення гарячих точок або пожежних розривів, вони часто використовуються в боротьбі з пожежами, уповільнюючи їх поширення за допомогою методів скидання вогню .

DroneDeploy: Це програмне забезпечення для дронів, яке дозволяє автоматизувати процеси зйомки та обробки зображень, використовуючи дрони для виявлення та картографування лісових пожеж та інших природних небезпек.

У контексті виявлення та моніторингу лісових пожеж, DroneDeploy може бути використаний для наступних цілей:

1. Моніторинг: Програмне забезпечення дозволяє налаштувати дрон на автоматичний політ над територією, що підлягає моніторингу. Дрон може проводити зйомку зображень з високою роздільною здатністю, які потім використовуються для аналізу та виявлення змін, включаючи виявлення пожеж.
2. Обробка зображень: Отримані з дрона зображення підлягають подальшій обробці за допомогою програмного забезпечення DroneDeploy. Це

дозволяє створювати детальні картографічні матеріали та тривимірні моделі місцевості, які можуть використовуватися для аналізу та виявлення лісових пожеж.

3. Аналіз та виявлення: Зображення та дані, отримані з дрона та оброблені програмним забезпеченням DroneDeploy, можуть бути проаналізовані з метою виявлення потенційних джерел пожежі. Алгоритми обробки та аналізу даних можуть виявляти підозрілі ділянки, які можуть вказувати на наявність пожежі або потенційну загрозу.
4. Подальші дії: Отримані результати аналізу можуть бути використані для прийняття рішень щодо координації дій з боротьби з пожежею, направлення рятувальних сил та виконання інших необхідних заходів.

Загалом, DroneDeploy є потужним інструментом для моніторингу та виявлення лісових пожеж, який допомагає забезпечити оперативну реакцію на кризові ситуації та запобігти поширенню збитків.

1. **DroneDeploy:**
    - Висока точність: Завдяки можливості автоматичного польоту дронів та високоякісній обробці зображень, DroneDeploy забезпечує високу точність результатів.
    - Гнучкість та мобільність: Використання дронів дозволяє отримувати дані з великою гнучкістю та мобільністю, що особливо важливо для моніторингу важкодоступних територій.
    - Обмеженість радіусу дії: Використання дронів обмежено радіусом дії, що може ускладнювати моніторинг великих територій. (25)

1.2 Архітектура мережі Інтернету речей для виявлення Лісових пожеж

Архітектура мережі Інтернету речей для виявлення Лісових пожеж (АМІРВЛП) - це система для моніторингу лісів та раннього реагування лісових пожеж, яка створена для полегшення роботи у пожежонебезпечні сезони.

Проаналізувавши вище згадані способи моніторингу, можна зробити певні висновки. Через те що площа лісів може варіюватися від кількох квадратних

кілометрів до десятків тисяч гектарів, тому вони вимагають різного підходу до спостереження. Відеоспостереження може бути ефективним при малих площах, та абсолютно не підходити для великих, через необхідність встановлення величезної кількості камер, та спостережних пунктів для зв'язку з камерами. Для такого випадку у цю ланку додати супутник, наприклад орендований Terra або MODIS, який зможе надати більш ширше зображення при менших затратах. Проте не варто забувати про його обмежену роздільну здатність, та малу частоту оновлення. Враховуючи що моя система орієнтується на найшвидшому способі реагування на пожежі, маю закрити цю діру. Для цього, крім відео та супутникового моніторингу, я додам БПЛА. Які зможуть виконувати таку собі роль екстреної перевірки на наявність пожежі. Крім того дрони будуть також залучені для моніторингу в реальному часі. За допомогою камер та датчиків температури, встановлених на дронах, вони зможуть виявляти можливі пожежі там де камери відеоспостереження не зможуть побачити. За допомогою супутників можна виявляти координати пожеж та спостерігати за величезними ділянками лісу безперервно. Уся інформація обробляється здебільшого автоматизовано. Таким чином можна запобігти пожежам ще на стадії займання. Система використовує існуючу інфраструктуру мобільних операторів (базові станції, телекомунікаційне обладнання та сервісні бригади). Масштабованість і розширюваність системи роблять її придатною для виявлення лісових пожеж на малих і великих площах. Архітектура системи моніторингу лісового господарства показана на рисунку 2.5. [11]

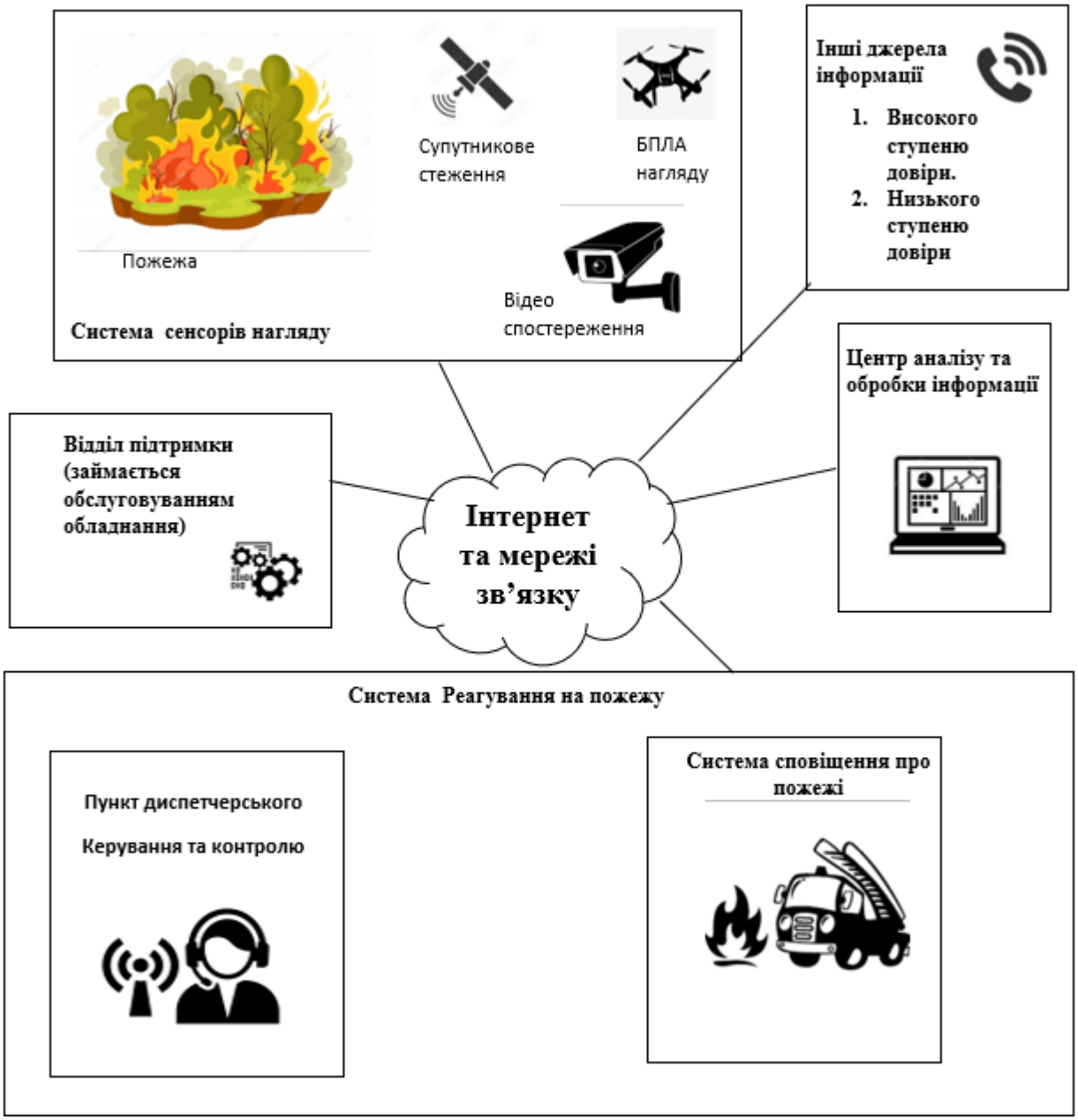

Рис. 1.7 Архітектура системи мережі Інтернету речей для виявлення Лісових пожеж

Ідея використання багатьох методів моніторингу даних, у вигляді певної `системи полягає у створенні максимально ефективної системи реагування, в якій усі елементи будуть поєднані за допомогою інтернету речей, і виконувати різні функції однієї системи сенсорів нагляду. Вона включає в себе супутники, БПЛА, відеокамери та інші датчики.

Попри функціональність, така структура мала низку обмежень, що знижували її ефективність та масштабованість у реальних умовах експлуатації.

Наприклад, величезна площа лісу потребує великої кількості камер, які водночас має хтось переглядати у реальному часі, що створює велику нестачу кадрів, нагрузку на центр прийняття рішень та звісно бюджет. Зокрема, окремі компоненти системи працювали ізольовано, між ними бракувало уніфікованої платформи для обробки даних, а БПЛА були інтегровані у загальну архітектуру не як повноцінні елементи IoT-мережі, а частково управлялися вручну.

Для переходу до більш сучасної, гнучкої та інтелектуальної системи, виникає потреба у модифікації початкової архітектури. Сучасні IoT-платформи дозволяють об’єднати сенсори, відеокамери, модулі штучного інтелекту та безпілотні літальні апарати у єдиний інформаційний контур із централізованим керуванням, аналітикою та прийняттям рішень. Такий підхід дає змогу значно підвищити точність виявлення пожеж, зменшити кількість хибних спрацювань, скоротити час реагування та забезпечити адаптивність системи до змінних умов.

Висновки до розділу 1

У першому розділі магістерської роботи було розглянуто теоретичні засади побудови систем моніторингу надзвичайних ситуацій, зокрема лісових пожеж, а також проаналізовано **базову архітектуру системи моніторингу**, що використовується як вихідна модель для подальших досліджень. Описано основні компоненти такої системи, принципи її функціонування та взаємодію між окремими елементами.

У ході аналізу базової системи встановлено, що вона забезпечує можливість збору інформації з різних джерел, зокрема відеокамер, сенсорних пристроїв, безпілотних літальних апаратів та супутникових систем. Разом із тим виявлено низку обмежень, характерних для такої архітектури, зокрема недостатній рівень автоматизації обробки даних, залежність від людського фактора під час прийняття рішень, а також відсутність єдиного підходу до інтеграції та уніфікації інформаційних потоків.

Проведений огляд існуючих методів і засобів моніторингу дозволив показати, що базова система, незважаючи на свою функціональну повноту, не

забезпечує необхідного рівня оперативності та достовірності виявлення пожеж на ранніх стадіях. Це обумовлює потребу у вдосконаленні архітектури шляхом впровадження сучасних інформаційних технологій, здатних забезпечити автоматизований аналіз даних та скорочення часу реагування.

Отримані у першому розділі результати стали підґрунтям для формування вимог до модифікованої системи моніторингу. Зокрема, обґрунтовано доцільність інтеграції централізованої IoT-платформи, використання алгоритмів штучного інтелекту для аналізу відеоданих та побудови єдиного інформаційного простору для всіх джерел даних. Це дозволило перейти у другому розділі до розроблення та детального опису **модифікованої архітектури системи**, яка усуває виявлені недоліки базового рішення та підвищує ефективність моніторингу надзвичайних ситуацій.

РОЗДІЛ 2

МОДИФІКОВАНА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ІОТ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

2.1. Обґрунтування необхідності модифікації базової архітектури

У другій частині роботи розглядається модифікація попередньої архітектури шляхом впровадження IoT-платформи **ThingsBoard** для уніфікованого збору та обробки телеметрії, інтеграції **модуля штучного інтелекту** для аналізу відеопотоків, а також включення БПЛА до IoT-інфраструктури як активних і пасивних елементів моніторингу. Запропоновані зміни спрямовані на створення цілісної, масштабованої та інтелектуально керованої системи виявлення лісових пожеж, яка перевершує попередню версію за точністю, автономністю та рівнем автоматизації.

Система сенсорів нагляду включала набір розрізнених джерел інформації: датчики температури та диму, відеокамери, супутниковий моніторинг та БПЛА. Кожен із цих елементів функціонував окремо, не був інтегрований у спільну IoT-мережу та не використовував єдиний механізм передачі, обробки і фільтрації даних. У модернізованій архітектурі ці недоліки усуваються шляхом інтеграції IoT системи ThingsBoard яка дає змогу інтерпретувати всі підключені пристрої (датчики, камери, бпла) як вузли, і отримувати від них інформацію у вигляді телеметрії. Крім того встановлення Веж з AI модулями, які будуть обробляти зображення з камер прямо на встановлених вежах, тим самим зменшуючи навантаження на центр обробки інформації, який буде суттєво спрощений, через використання ThingsBoard IoT.

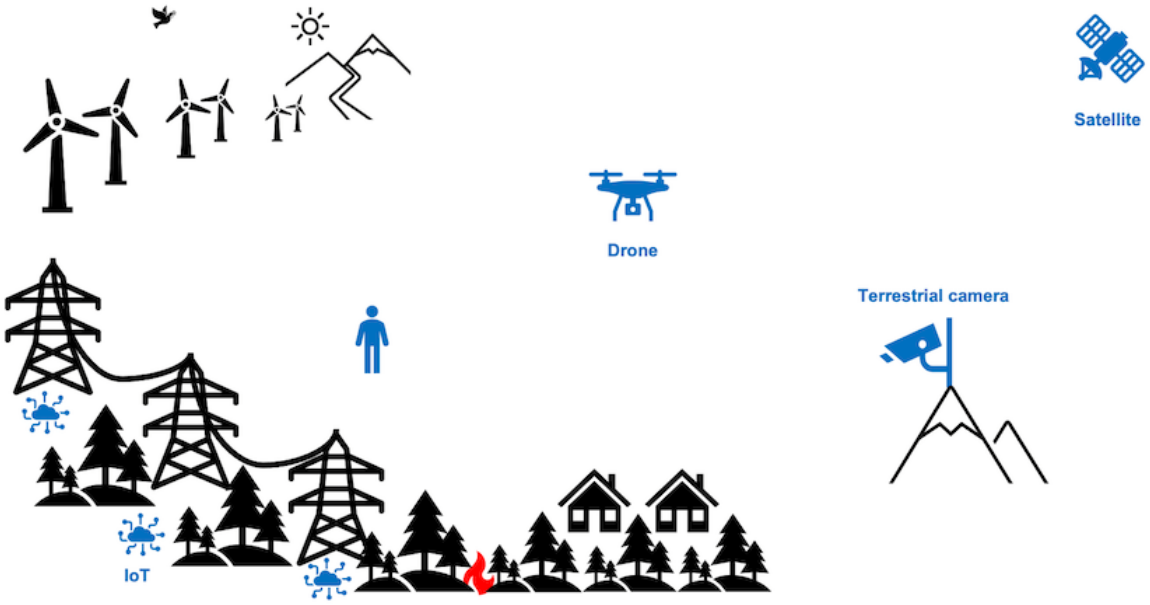

Рис. 2.1 схематичне зобження системи сенсорів нагляду

Отже, модифікований блок складається з:

1. Наземних датчиків,
2. Відеокамер,
3. БПЛА,
4. Веж з AI модулями.
5. Супутникових джерел підтвердження.

Об’єднання цих елементів у єдину IoT-модель забезпечує централізацію збору даних, підвищує точність аналізу та зменшує кількість хибних спрацювань.

2.2. Модифікований блок системи сенсорів нагляду

2.2.1. Відеокамери та AI модуль

У попередній архітектурі камери відеоспостереження передавали зображення безпосередньо у центр аналізу, де здійснювався подальший розгляд та прийняття рішень. Такий підхід створював значне навантаження на канал зв’язку, вимагав додаткових обчислювальних ресурсів у центральному вузлі та збільшував затримку між моментом фіксації події та обробкою відеопотоку.

Рис. 2.2 Встановлена камера на стовбурі дерева

У модифікованій архітектурі ці недоліки усуваються шляхом введення польового модуля відеоаналітики (AI), розміщеного на вежах або локальних серверах збору даних. На цих серверах виконується повний цикл попередньої обробки відеопотоку за допомогою алгоритмів штучного інтелекту.

Принцип роботи підсистеми

1. Камери, розміщені по периметру території, безперервно транслюють відеопотік на найближчу вежу обробки. На вежі встановлений AI модуль, який у режимі реального часу виконує аналіз відеопотоку, виявлення диму чи полум’я, фільтрацію шумів і перешкод, а також генерацію подій (alerts).
2. Система не передає відео в центр, а формує структуровані події у вигляді телеметрії:
    - ймовірність пожежі,
    - координати камери,
    - кадр підтвердження (опційно),
    - час виявлення.
3. Ці події передаються через API у ThingsBoard, де об’єднуються з даними інших польових IoT-вузлів (сенсорів, БПЛА, супутникових джерел).
4. Центр аналізу тепер не витрачає ресурси на обробку відео, а працює тільки з метаданими, що значно підвищує швидкість прийняття рішень.

Підсистема відеоспостереження в модифікованій архітектурі ґрунтується на принципі **аналізу відео AI**: зображення з камер обробляється не в центральному дата-центрі, а безпосередньо на вежі, де розміщено спеціалізований сервер з ШІ. На базовому рівні робота підсистеми описується ланцюжком:

Камери → PoE-комутатор → AI-сервер на вежі → Інтернет (API ключ to API) → ThingsBoard IoT

Кожна група з 10 камер підключається до одного модулю AI-серверу обробки. Сервер отримує відеопотоки, виконує аналіз за допомогою моделей штучного інтелекту, формує структуровані події (детектовано дим/полум’я, координати, рівень ймовірності) і вже ці події, а не відео, передає через API до платформи ThingsBoard.

Рис. 2.2 Камера закріплена на висоті 50м

Для коректної роботи алгоритмів штучного інтелекту важливо забезпечити стабільність зображення. Тому в системі застосовуються:

- Статичні IP-камери,
- з фіксованим кутом огляду,
- без постійного обертання PTZ-механізмів у робочому режимі.

Причини такого вибору:

1. AI-моделі навчені на постійній перспективі сцени. Коли камера обертається, змінюються фон, горизонти, джерела світла. Це призводить до великої кількості помилкових спрацювань та потребує більш складних моделей.
2. Спрощення калібрування. Для статичної камери один раз налаштовуються:
    - зона аналізу,
    - маски небажаних об’єктів (дороги, будівлі),
    - геоприв’язка для визначення координат виявленої пожежі.

При розгортанні камери розглядаються як **сенсор покриття території**. Основні принципи:

Висота встановлення. Камера монтується на щоглі/вежі/дереві на висоті, що забезпечує максимальний огляд лісового горизонту (часто 10–50 м).

Кут нахилу. Орієнтується так, щоб лінія горизонту знаходилась у верхній третині кадру — це дає змогу бачити як верхівки дерев, так і відкриті ділянки.

Перекриття зон. Поля зору сусідніх камер повинні частково накладатися, щоб уникнути «мертвих» зон.

Уникнення сліпих зон. Не допускається перекриття огляду гілками, будівлями, конструкціями.

Освітлення та відблиски. Бажано орієнтувати камеру так, щоб пряма сонячна засвітка в об'єктив траплялася мінімально (орієнтація на північний чи південний схил, залежно від місцевості).

Яку площу покриває одна вежа

Беремо дальність огляду однієї камери ≈ **60 км**.

Це по суті радіус зони, в межах якої камера здатна побачити дим/полум'я за гарних умов видимості. Тоді **одна вежа** з камерами, орієнтованими по колу, покриває круг радіусом 60 км:

$$S = \pi R^2 = \pi \cdot 60^2 \approx 11\,300 \text{ км}^2$$

Тобто одна правильно спроєктована вежа з комплектом камер теоретично контролює **понад 11 тисяч км²** території. Кількість камер (100 vs 10) **не збільшує радіус**, а підвищує щільність спостереження й якість детекції: менше "сліпих зон", краща роздільна здатність у різних діапазонах, резервування.

Кожна камера є **мережевим IP-пристроєм** та підключається до вежі через:

- **виту пару (Ethernet)**,
- з використанням **PoE (Power over Ethernet)**.

На вежі встановлюється:

- **PoE-switch**, наприклад на 8–16 портів,
- який забезпечує живлення камер (48 В) та передачу даних до Edge-серверу.

Переваги такого підходу:

- немає потреби прокладати окремі лінії живлення до кожної камери;
- центральне керування живленням (можна перезавантажити камеру через switch);
- спрощене обслуговування: один кабель = живлення + дані.

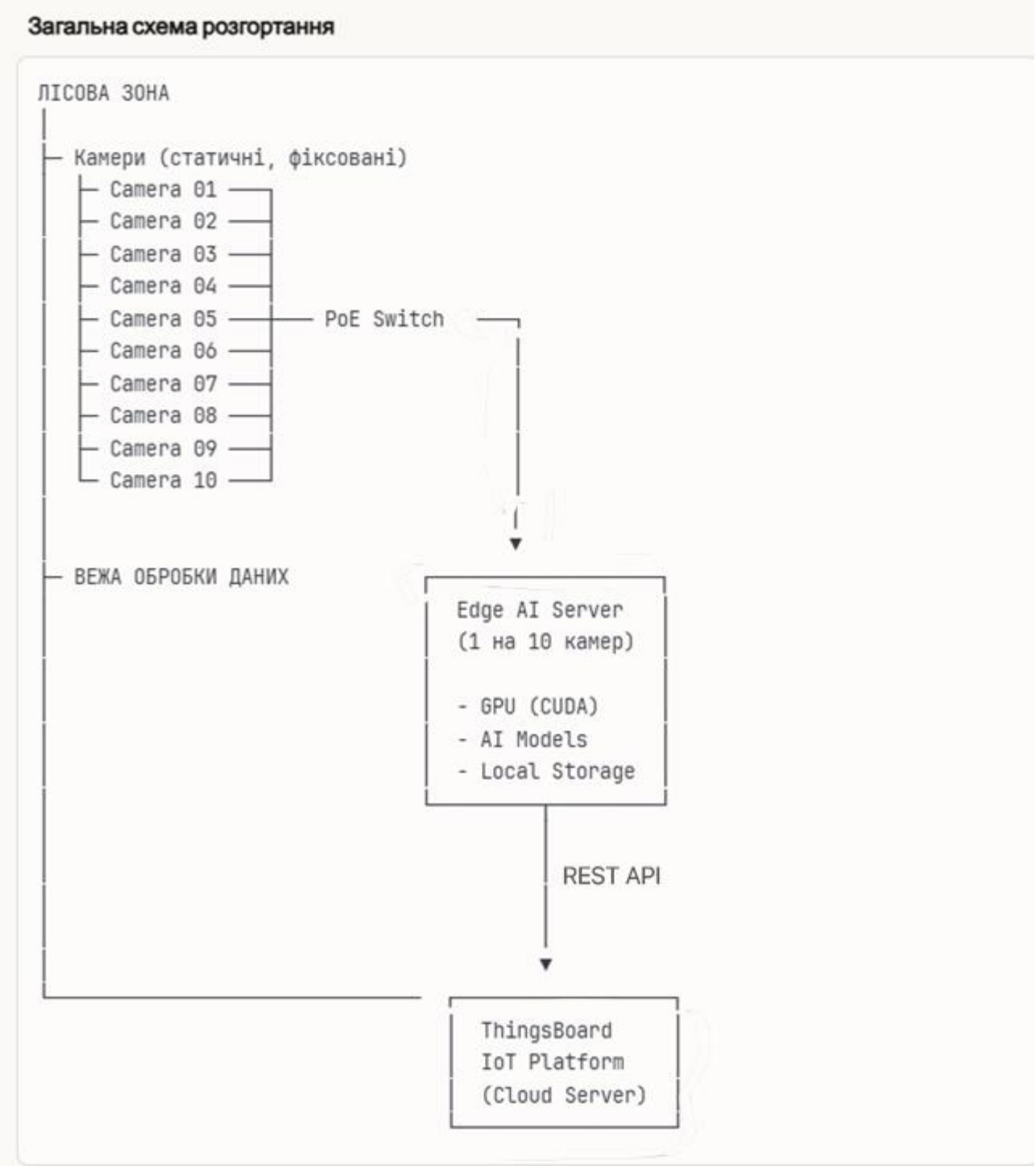

Рис. 2.3 Схема роботи Відеокамер та AI модуля

На зображенні представлено загальну архітектуру системи моніторингу, що складається з мережі камер у лісовій зоні та вежі обробки даних. Десять статичних камер під'єднуються до PoE-комутатора, який забезпечує їх живлення та передачу відеопотоку. Усе відео надходить на AI-сервер, що обслуговує групу з 10 камер та виконує локальну обробку даних: запуск моделей штучного інтелекту, аналіз відео в реальному часі та зберігання тимчасових даних. Після

аналізу результати надсилаються через REST API до хмарної IoT-платформи ThingsBoard, де здійснюється централізований моніторинг, візуалізація та оповіщення про потенційні небезпеки.

PoE-комутатор (Power over Ethernet switch)

Це мережевий комутатор, який одночасно забезпечує передачу даних та електроживлення по одному кабелю Ethernet. Тобто кожна камера отримує і мережеве підключення, і живлення через той самий кабель, без потреби у додаткових блоках живлення або окремій електричній проводці.

Як працює PoE-комутатор

PoE-комутатор подає електричний струм низької напруги (зазвичай 48V) по вільних жилах кабелю Ethernet або по тих же жилах, якими передаються дані. Завдяки цьому:

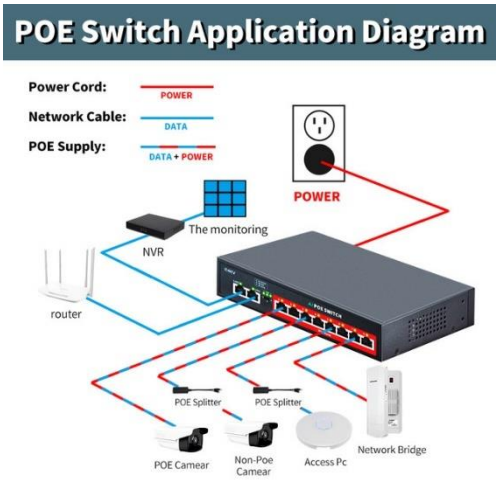

Рис. 2.4 PoE світч

- мережеве обладнання (камери, сенсори, Wi-Fi точки доступу) може працювати без підключення до зовнішньої електромережі;
- подача живлення є стабільною, контрольованою та безпечною;
- обладнання автоматично узгоджує споживану потужність із комутатором.

PoE підтримує стандарти IEEE 802.3af / 802.3at / 802.3bt, що визначають максимальну допустиму потужність на один порт (від 15 Вт до 90 Вт).

Живлення камер без необхідності прокладати окремий електричний кабель

У лісовій зоні або на вежі складно і дорого тягнути окреме електроживлення до кожної камери.

PoE дозволяє:

- уникнути монтажу додаткової електропроводки,
- значно спростити структуру обладнання,
- зменшити кількість точок відмови.

Один Ethernet-кабель = живлення + дані.

PoE-комутатор дозволяє віддалено перезавантажити камеру, вимкнути/увімкнути живлення, або контролювати споживання.У системах із сотнями камер це критично для стабільності та обслуговування.

Безпека та захист обладнання

PoE має вбудовані механізми захисту від перенапруги,автоматичного відключення не сумісних пристроїв, визначення максимальної потужності. Це гарантує, що камери не будуть пошкоджені.

Спрощення монтажу та зниження вартості

Завдяки PoE:

- не потрібні окремі адаптери живлення,
- зменшується кількість кабелів на вежі,
- знижується вартість інфраструктури,
- монтаж займає менше часу.

REST API: принцип роботи, призначення та переваги

REST API – це абревіатура від Representational State Transfer Application Programming Interface. Тобто, API з передачею репрезентативного стану. Це популярний архітектурний стиль для веб-сервісів, в якому клієнт та сервер обмінюються даними (репрезентаціями) ресурсів. Ключовий принцип REST — відсутність стану (statelessness), що означає, що кожен запит клієнта повинен містити всю інформацію, необхідну серверу для його обробки.

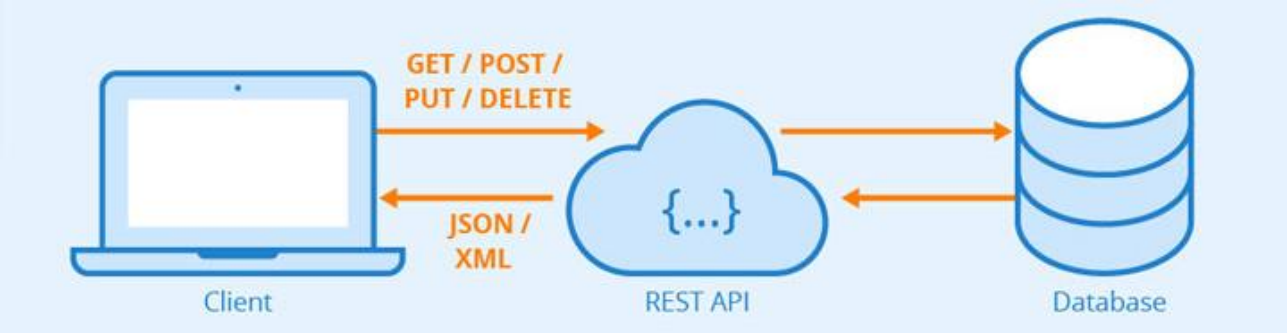

Рис. 2.5 Робота REST API

Майже всі сучасні великі веб-сервіси та платформи, які надають доступ до своїх даних або функціоналу, використовують REST API.

- Google Maps API — дозволяє додавати карти, маршрути та геолокацію до сайтів і застосунків.

- Twitter/X API — забезпечує автентифікацію, доступ до твітів та аналітики платформи.
- GitHub REST API — використовується для керування репозиторіями, користувачами та комітами.
- Stripe API — дає змогу приймати платежі онлайн та керувати транзакціями.
- OpenWeatherMap API — надає дані про погоду, прогнози та історію спостережень.
- YouTube Data API — використовується для інтеграції відео, плейлистів і статистики з YouTube.
- Spotify Web API — дозволяє отримувати інформацію про треки, альбоми та створювати музичні добірки.
- Slack API — для інтеграції ботів, повідомлень і користувацьких застосунків у робочих просторах.

З технічного погляду, REST API працює за принципом запит–відповідь. Edge AI-сервер формує повідомлення з результатами аналізу (наприклад, факт виявлення диму, координати, рівень впевненості моделі) і надсилає його на хмарну платформу через HTTP-запит. Сервер ThingsBoard приймає ці дані, перевіряє їхню коректність та зберігає в базі даних. У відповідь він може надіслати код успіху або повідомити про помилку. Такий механізм забезпечує надійну та передбачувану комунікацію між розподіленими компонентами системи.

REST API застосовується для того, щоб стандартизувати обмін даними між різними частинами системи. Оскільки камери та Edge AI-модулі працюють локально на вежі, а платформа моніторингу — у хмарі, необхідний універсальний спосіб передавати результати аналізу. REST API вирішує це завдання, дозволяючи надсилати всі події, метрики або статуси в єдиному форматі. Він також дозволяє хмарній платформі взаємодіяти з іншими службами, наприклад, надсилати сповіщення, запускати аналітичні сценарії або передавати дані іншим клієнтам системи.

Використання REST API є зручним завдяки його простоті та універсальності. Він не залежить від конкретної мови програмування чи операційної системи: будь-який пристрій, здатний відправити HTTP-запит, може працювати з REST API. Це значно спрощує інтеграцію системи, масштабування та розширення її функцій. Крім того, REST-підхід забезпечує легкий моніторинг, тестування та налагодження, оскільки всі запити можуть бути відтворені вручну або автоматизовано. Завдяки цьому REST API став фактичним стандартом для IoT-систем, хмарних сервісів та інфраструктур штучного інтелекту.

Отже, я розглянув принцип роботи модифікації пов’язаної з AI модулями інтегрованими в мою Архітектуру мережі інтернету речей для виявлення лісових пожеж, яке в своїй основі складається в розміщенні польових серверів для обробки зображення з камер, і подальшої передачі даних у модифікований центр прийняття рішень у вигляді платформи ThingsBoard.

2.2.2. AI модульVEZHA Smoke & Fire Detection

Як один із варіантів реалізації модуля відеоаналізу можна використовувати комерційне рішення VEZHA Smoke & Fire Detection від IncoreSoft, яке підтримує RTSP/ONVIF-камери, забезпечує real-time виявлення диму/полум’я, формує події з часовими мітками, координатами, кадрами — і надсилає їх як події/тривоги до IoT-платформи.

Рис. 2.6 Виявлення диму та вогню з VEZHA

Система відеовиявлення диму та вогню — це передова технологія безпеки, яка використовує камери відеоспостереження або IP-камери в поєднанні з інтелектуальною відеоаналітикою для виявлення ознак диму або полум'я в режимі реального часу. На відміну від традиційних точкових детекторів, які покладаються на тепло або частинки, що досягають датчика, система відеовиявлення аналізує потоки відео в реальному часі, щоб виявляти шлейфи диму або поведінку вогню на самій ранній стадії — навіть у великих, відкритих або на вулиці приміщеннях.

Таблиця 2.1- Порівняння технічних та бізнес-інструментів VEZHA

Технічні	Бізнес / Операційний
Роздільна здатність камери, динамічний діапазон, об'єктив, ІЧ/тепловізійні можливості	Відповідність нормативним вимогам (NFPA, UL) та прийняття
Обробка на периферії проти серверної/хмарної архітектури	Окупність інвестицій: уникнення пошкоджень, швидше реагування
Перенавчання моделі, налаштування порогів, фільтрація хибних тривог	Зменшення ручної перевірки, операційна ефективність
Інтеграція (API, вебхуки, PSIM / SCADA)	Робочі процеси: хто отримує сповіщення, як вони реагують

Інтелектуальна відеоаналітика IncoreSoft дозволяє виявляти дим і вогонь у критичних середовищах на ранній стадії. Зручний інтерфейс робить систему інтуїтивно зрозумілою в експлуатації. Легко встановіть межі для визначення і запустіть аналітику. Вона негайно почне моніторинг і виявлення будь-яких випадків диму та вогню, надсилаючи сигнали тривоги та створюючи події. Відеоаналітика IncoreSoft повністю адаптується до вашої інфраструктури. Система розрізняє дим і вогонь, запобігаючи швидкому погіршенню вже небезпечної ситуації. Навіть якщо виявлено лише дим, можна швидко визначити його джерело, встановити, чи існує реальна загроза, і відповідно реагувати.

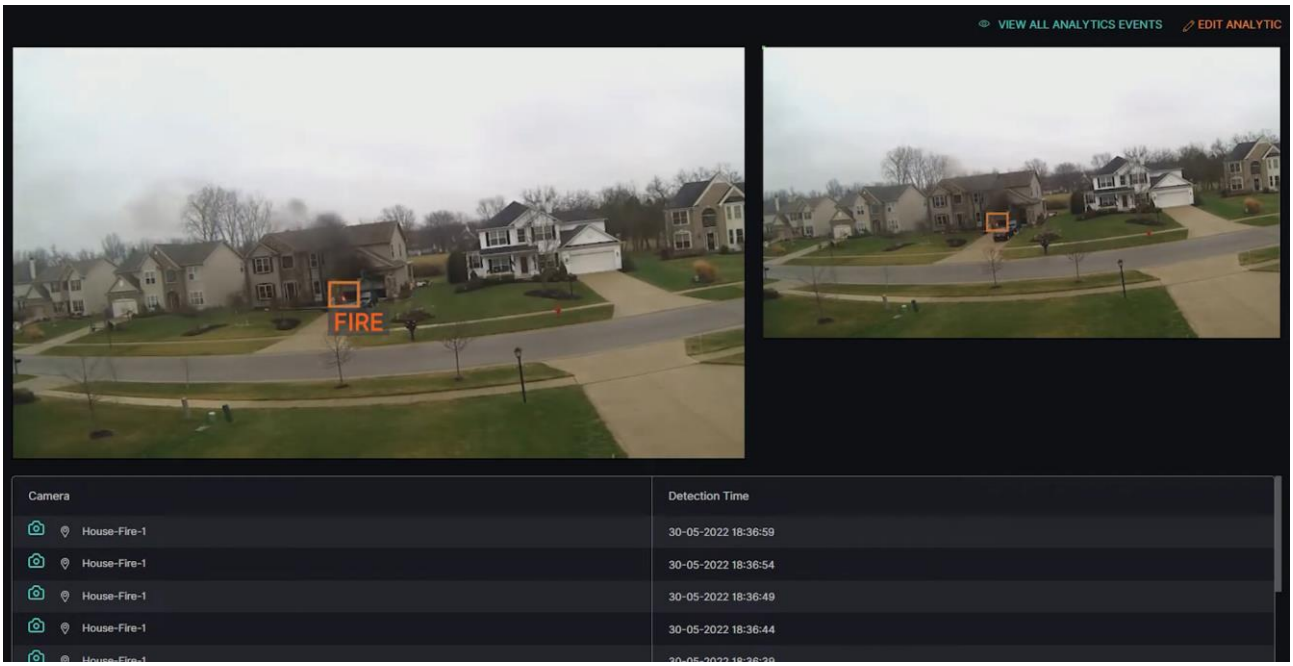

Рис. 2.7 Автоматичне виявлення вогню з алгоритмами VEZHA

Як працює відеовиявлення пожежі та диму? До кожної вежі встановлено велику кількість камер, які поділені на групи по 10 штук, а кожну таку групу обслуговує окремий AI модуль. Камери працюють безперервно, скануючи простір у своєму секторі, і передають відеопотік через PoE-комутатор на локальний AI-сервер. Це важливо, тому що вся первинна аналітика відбувається локально — не у хмарі, а саме на вежі. Це дозволяє значно зменшити затримку та обсяг даних, які потрібно передавати, а також уникати залежності від стабільності інтернету в польових умовах.

Коли камери передають відео, AI модуль аналізує його в реальному часі за допомогою моделей штучного інтелекту, які навчені розпізнавати ознаки диму — розсіювання, зміни світла, характерну динаміку шлейфу, а також ознаки відкритого полум’я. Алгоритм працює постійно й визначає, чи є у кадрі аномалії, які можуть бути небезпечними. Система враховує погодні умови, фільтрує туман, пил, відблиски сонця та інші фактори, що часто спричиняють помилкові спрацьовування у звичайних системах.

Якщо AI виявляє потенційний дим або вогонь, він не відправляє сповіщення одразу. Спершу відбувається локальна перевірка: інші камери тієї ж групи можуть перенаправити свій зум у той самий сектор, а сусідні модулі також намагаються підтвердити подію. Це дозволяє зменшити кількість хибних тривог

і зібрати більше інформації про об’єкт. Крім того, система визначає напрямок (азимут) до вогнища з кожної камери, яка його бачить. Коли дві або більше камер зафіксовують одну й ту саму подію, VEZHA виконує трилатерацію — математичний процес обчислення точного місця розташування пожежі за перетином ліній напрямків.

Після того як подія підтверджена й координати розраховані, Edge AI сервер формує структуроване повідомлення з усіма даними: координати займання, рівень впевненості моделей, час, номер камери, а при потребі — фрагмент зображення або коротке відео. Це повідомлення через REST API надсилається до хмарної IoT-платформи ThingsBoard. Хмара отримує дані, зберігає їх, візуалізує на карті та, якщо потрібно, надсилає автоматичні оповіщення відповідним службам.

Таблиця. 2.2 - Процес відеовиявлення пожежі та диму

1	Вибір та розміщення камери: Оберіть камери з належною роздільною здатністю, динамічним діапазоном та полем зору для зони, що охороняється, від ліній дахів до лісових галерей чи заводських ангарів
2	Попередня обробка: Алгоритми нормалізують кадри, видаляючи артефакти об'єктива, компенсуючи погодні умови або шум і враховуючи зміни освітлення
3	Виявлення кандидата: Методи на основі правил або моделі глибокого навчання виділяють області, що демонструють поведінку, подібну до диму або полум'я, з часовими перевірками, щоб уникнути хибних тривог від тіней, хмар або пари
4	Оцінка достовірності та фільтрація: Порогові значення, ансамблеві моделі та контекстні правила (туман, контрольовані опіки) зменшують кількість хибно-позитивних результатів та підвищують надійність

5	Оповіщення та докази: Коли рівень достовірності виявлення перевищує встановлену межу, система генерує пакет тривоги з ідентифікатором камери, міткою часу, геопозицією та візуальними доказами, надсилаючи його операторам або запускаючи автоматичні відповіді

Таким чином система працює повністю автономно 24/7. Камери забезпечують велику дальність огляду — до 60 км, а їх щільне розміщення дозволяє перекривати величезні території. Алгоритми працюють без участі людини та здатні розпізнавати пожежу на дуже ранніх стадіях, часто тоді, коли дим тільки починає підійматися й непомітний неозброєним оком або зі супутника.

VEZHA Smoke & Fire Detection не просто виявляє пожежу — вона формує інтелектуальну систему спостереження, яка самостійно аналізує, перевіряє, порівнює та передає результати в реальному часі. Завдяки цьому реагування на пожежу може початися вже через хвилини після займання, що істотно зменшує збитки, площу поширення та ризики для людей.

Додавання відеодетекції як додаткового інструменту до звичайних датчиків вогню та диму тп використання його як самостійного інструменту для відкритих приміщень або будівель з великою площею та високими стелями. У ситуації, коли кожна секунда має значення, це дає вам величезну перевагу в гасінні пожежі. У випадках, коли традиційні технології виявлення не працюють, відеоаналітика є надійним, відмовостійким рішенням для захисту людей, майна та виробничого процесу. VEZHA Smoke & Fire Detection генерує події, які потім можна ретельно вивчити для подальшого розслідування. (22)

2.2.3 Модифікація БПЛА

У модифікованій архітектурі системи безпілотні літальні апарати інтегруються як мобільні IoT-вузли, що здатні здійснювати постійний моніторинг лісової території та брати участь у прийнятті рішень щодо підтвердження можливих осередків займання. Вони працюють у двох режимах

— пасивному та активному. У пасивному режимі БПЛА виконують планове патрулювання за заздалегідь визначеними маршрутами, передаючи у систему відеопотік, дані про місцеположення, висоту польоту, стан довкілля та власні технічні параметри, що дозволяє регулярно оновлювати інформацію про територію, включно зі «сліпими зонами», не покритими стаціонарними сенсорами. Активний режим застосовується тоді, коли штучний інтелект або польові сенсорні вузли не можуть однозначно інтерпретувати ситуацію, тобто коли рівень впевненості у визначенні пожежі недостатній або дані суперечливі. Причинами такої невизначеності можуть бути несприятливі погодні умови (туман, опади, задимлення), поганий ракурс камер, перешкоди у вигляді рослинності, відблиски, низька якість відеосигналу чи часткове виявлення ознак диму без підтверджених ознак полум’я. У таких випадках платформа ThingsBoard автоматично формує для БПЛА місію з вилітом у вказану точку, де апарат проводить деталізоване обстеження та передає відео для повторного аналізу ШІ. Отримані результати дозволяють системі підтвердити або спростувати наявність пожежі чи позначити ділянку як таку, що потребує подальшого спостереження. Завдяки комбінованому використанню двох режимів робота БПЛА підвищує точність виявлення, скорочує час реагування, зменшує кількість хибних спрацювань та забезпечує повноцінне покриття території, роблячи БПЛА ключовим елементом багаторівневої IoT-системи моніторингу лісових пожеж.

Крім того мною було запропоновано використання спеціальних пожежних дронів. Це відмінне рішення для гасіння ранньо-виявлених пожеж у невеликих масштабах.

Рис. 2.8 Пожежний БПЛА

Дрони мають багато переваг, таких як:

- Моніторинг пожежі
- Доставка матеріалів
- Пошуково-рятувальна служба
- Доступність

Крім того вони здатні проводити і самі пожежні операції. Кожен такий дрон завантажений пожежним рукавом діаметром 40 мм, глибина пожежогасіння може сягати до 15 метрів, швидко піднімаючись до 50-150 метрів у повітрі протягом 1 хвилини, забезпечуючи гасіння пожежі на відстані 200 метрів, а також точне спрацьовування поблизу будівлі на відстані 5 метрів, глибина пожежогасіння може сягати до 15 метрів.

1. Тривала витривалість при важкому навантаженні:

Максимальне навантаження становить 50 кг, а політ може тривати до 43 хвилин без навантаження.

2. Складаний дизайн:

З вертикальним складанням по чотирьох осях, модульною конструкцією, швидким керуванням та складанням, зручним щоденним транспортуванням.

3. Гасіння пожеж на великій відстані за межами видимості:

Дистанційне керування та швидке пожежогасіння можуть бути реалізовані та виконані з місця зльоту БПЛА до індивідуальної точки пожежі. Операції з пожежогасіння можуть бути

4. Камера з 30-кратним оптичним зумом:

Стандартно оснащена камерою з 30-кратним оптичним зумом, надвеликою дистанцією, що дозволяє охопити всі деталі місця події, що може ефективно допомогти у складанні плану порятунку. Моніторинг подій, можливість спостереження.

З системою нічного бачення прицілювання (додатковий модуль вогнегасної бомби на висотній пусковій установці).Завдяки потужному навантаженню та протитреморній конструкції, потужному прицільному дзеркалу та високій рамі WK-1900 здатний стріляти вогнегасними снарядами. Дистанційно та точно в складних умовах пожежонебезпечної погоди. Це закінчується в режимі реального часу через графічну передачу, а перехресна цільова зірка доступна в клієнтській програмі APP, що значною мірою відображає цільову точку на наземному контролі. Покращує точність стрільби та підвищує ефективність

рятувальних операцій.

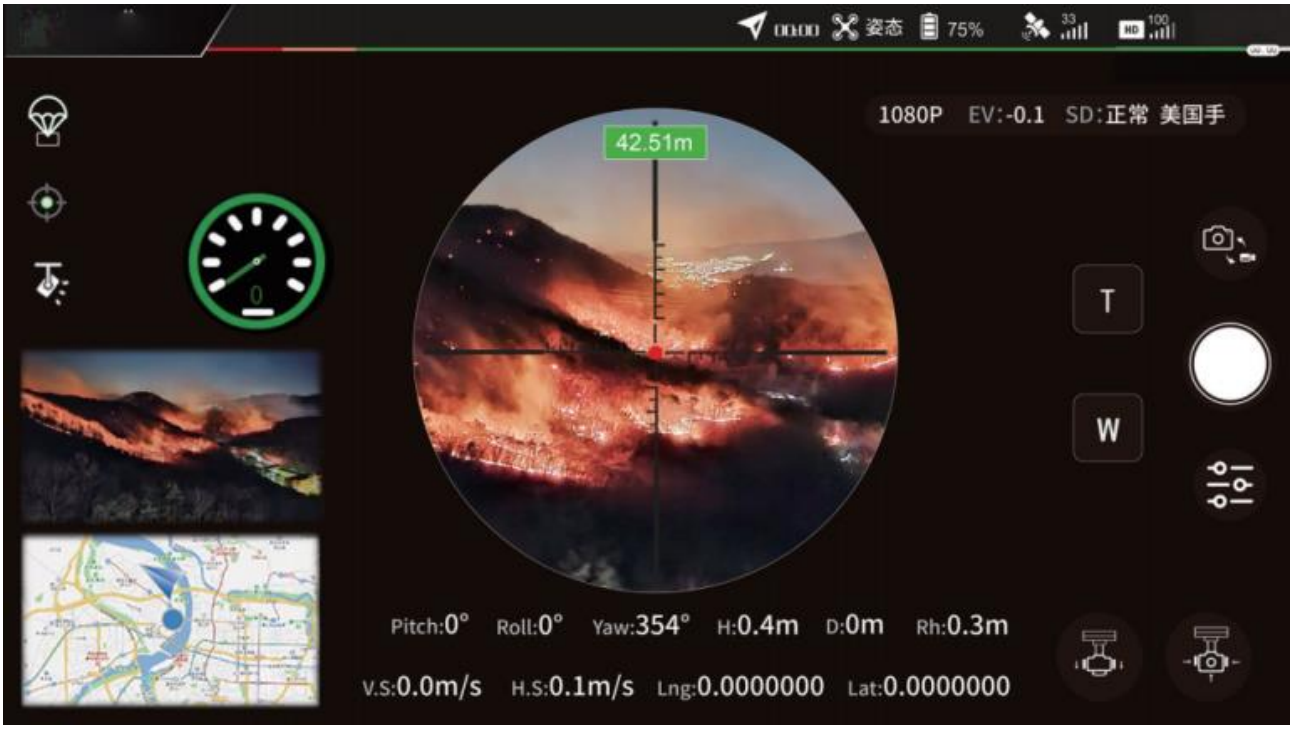

Рис. 2.9 Інтерфейс пожежного БПЛА

Такий БПЛА може проводити пожежогасіння різними методами. Наприклад:

- за допомогою порошкової бомби пожежної машини
- з водяного шланга
- сухим порошком

Використання професійних пожежних БПЛА, таких як рішення LEAFE-Tech, доповнює існуючу підсистему моніторингу і сприяє підвищенню загальної ефективності системи завдяки посиленню авіаційної складової, цілодобовому контролю великих територій і мінімізації ризиків для персоналу при первинному реагуванні. Це узгоджується з сучасними трендами у використанні безпілотних систем для спостереження, оцінювання ризиків і координації реагування на лісові пожежі Врешті решт інтеграція таких БПЛА в IoT-інфраструктуру, побудовану на ThingsBoard, дозволяє значно підвищити своєчасність і точність виявлення пожеж через комбінацію локальних сигналів з високою роздільною здатністю і широкомасштабних аерознімків, а також дозволяє гасити невеликі пожежі в швидкому темпі прямо на місці, до прибуття пожежних служб.*(26)*

2.2.4. Супутникові сервіси як високорівневі джерела підтвердження

Супутникові системи спостереження є одним із ключових інструментів дистанційного моніторингу природних процесів, зокрема і виявлення лісових пожеж. Супутник — це штучно створений об’єкт, що рухається орбітою навколо Землі або іншого небесного тіла і використовується для широкого спектра завдань: телекомунікації, навігації, картографування, збору наукових даних, кліматичних досліджень та контролю стану довкілля. Такі апарати можуть працювати на різних орбітальних висотах — низькій, середній або геостаціонарній — залежно від призначення, а їхня апаратура включає різноманітні сенсори, спектрометри та інші прилади для фіксації фізичних характеристик земної поверхні та атмосфери.

У контексті моніторингу природних процесів виділяють супутники, орієнтовані на спостереження за станом навколишнього середовища. Вони забезпечують отримання інформації про атмосферу, рослинний покрив, стан ґрунтів, океани, температурні аномалії та інші природні явища. Такі апарати є основою природничого (екологічного) моніторингу та використовуються для вивчення кліматичних змін, прогнозування погоди, контролю динаміки лісових масивів, а також для раннього виявлення стихійних лих. Окрему групу складають спеціалізовані супутники, створені для забезпечення потреб конкретних галузей — наприклад, системи зв’язку, точного позиціювання (GPS), навігації, земельного кадастру та транспортної логістики. Таким чином, супутникова інформація відіграє важливу роль як у наукових дослідженнях, так і в комерційних або адміністративних застосуваннях, включно з моніторингом пожеж.

У сфері виявлення лісових пожеж найбільш поширеними є супутники **TERRA** та **AQUA**, оснащені спектрометром **MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)**, а також супутники NOAA з апаратурою **AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)**. MODIS працює у великій кількості спектральних діапазонів — має 44 канали у видимому та інфрачервоному спектрах, що дозволяє фіксувати теплові аномалії та ознаки

пожежі. Просторове розрізнення зображення залежить від каналу й коливається від 250 м до 1 км на піксель; у тепловому спектрі роздільна здатність становить близько 1 км. За сприятливих умов MODIS здатен виявляти пожежі на площах від приблизно 50 м². Частота повторних спостережень території супутниками TERRA та AQUA варіюється від 4 до 12 разів на добу залежно від широти, що забезпечує відносно оперативне оновлення інформації.

Прикладом можливостей супутникових сенсорів є система **MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer)**, встановлена на супутнику Terra. MISR використовує дев'ять камер, спрямованих під різними кутами, що дозволяє визначати не лише наявність диму, але й оцінювати його висоту, рух, густину та кількість частинок у стовпі диму. Завдяки цьому можна встановити, чи піднімається дим вище прикордонного шару атмосфери, що має значення для прогнозування поширення забруднень. Такі можливості роблять супутникові дані цінним інструментом для стратегічного оцінювання масштабів і динаміки пожеж та допомагають підрозділам, які здійснюють гасіння пожеж з повітря, ефективніше планувати свої дії.

2.3. Центр аналізу та обробки даних на основі платформи ThingsBoard

2.3.1. ThingsBoard platform

ThingsBoard надає масштабовану, надійну та безпечну платформу для моніторингу навколишнього середовища . Завдяки вбудованій підтримці LoRaWAN, NB-IoT та Sigfox, вона дозволяє ефективно інтегрувати численні малопотужні датчики на великі відстані, мінімізуючи складність інфраструктури. Платформа підтримує стандартні протоколи Інтернету речей, такі як HTTP, MQTT, CoAP та LwM2M, що спрощує підключення широкого спектру пристроїв та масштабування відповідно до вашого проекту.

Автоматизовані функції — від сповіщень у режимі реального часу про критичні зміни до пересилання даних до зовнішніх аналітичних інструментів — забезпечують проактивний моніторинг. Інтуїтивно зрозумілі панелі інструментів, налаштовувана логіка та безшовна інтеграція перетворюють

необроблені дані про навколишнє середовище на практичну інформацію, що дозволяє приймати розумніші та швидші рішення.

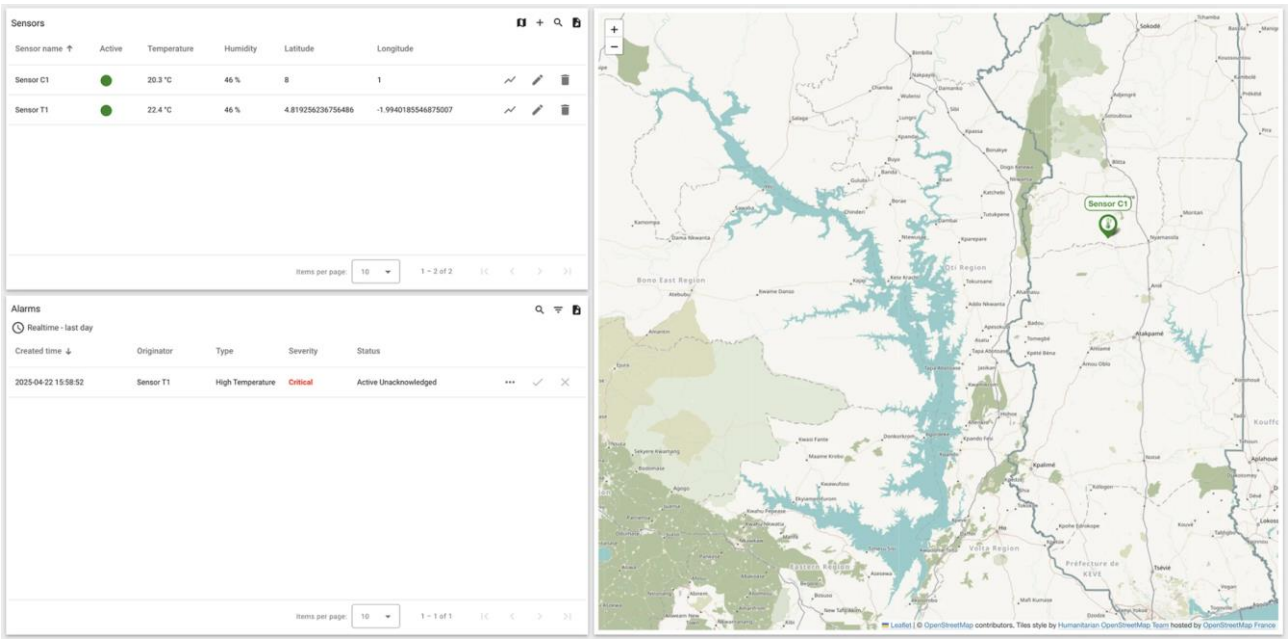

Рис. 2.10 Вигляд платформи ThingsBoard

Дані датчиків передаються до ThingsBoard за допомогою протоколів Інтернету речей, таких як HTTP, MQTT, CoAP та LwM2M, або через інтеграцію з серверами LoRaWAN та іншими платформами.

Вбудований механізм обробки потоків миттєво аналізує вхідні повідомлення, запускає події, генерує тривоги та спрямовує дані на панелі моніторингу. Зібрані дані візуалізуються за допомогою інтуїтивно зрозумілих панелей, що надає користувачам чітке уявлення про тривоги та показники продуктивності — все в режимі реального часу з єдиного інтерфейсу.

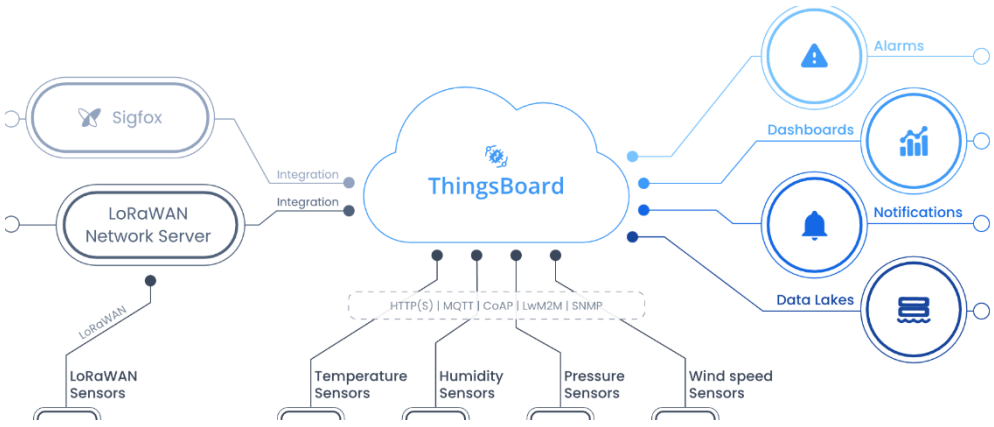

Рис. 2.11 ThingsBoard схематичне зображення

Панель керування має кілька станів. У головному стані відображається список датчиків, їхнє розташування на карті, а також список їхніх тривог. Ви можете переглянути стан деталей датчика, натиснувши на рядок таблиці. Стан деталей датчика дозволяє переглядати історію температури та вологості, змінювати налаштування датчика та його розташування. Панель керування в режимі реального часу є частиною шаблону рішення.

Панель керування забезпечує моніторинг даних датчиків у режимі реального часу за допомогою інтерактивних діаграм, що відображають такі показники, як температура та вологість. Інтерфейс дозволяє налаштовувати пороги спрацьовування тривоги та розташування датчиків, одночасно відображаючи активні тривоги з рівнями серйозності. Ви можете аналізувати історичні дані та керувати налаштуваннями пристрою.

Відстеження показників температури та вологості в режимі реального часу з датчика C1 разом з історичними даними за останню годину. Можливість порівняння ключових показників (мінімальні/максимальні/середні значення) для підтримки оптимальних умов навколишнього середовища.

2.3.2 Модифікація центру аналізу та обробки даних

Центр аналізу та обробки даних, реалізований на основі IoT-платформи ThingsBoard, виконує роль ядра всієї системи моніторингу та прийняття рішень. Саме сюди надходить телеметрія з усіх польових IoT-вузлів — наземних сенсорів, відеокамер із edge-AI, БПЛА та супутникових джерел. Платформа забезпечує централізований збір даних у режимі реального часу, уніфікує всі формати телеметрії та автоматично зберігає їх у time-series структурі, що дозволяє відстежувати історичні зміни стану лісової території.

2.3.3. Rule Engine як ядро логіки системи

Rule Engine у ThingsBoard – це основний механізм обробки даних, який відповідає за отримання, перетворення, маршрутизацію та реагування на події та телеметрію, що надходять від пристроїв та пов'язаних з ними ресурсів.

Механізм правил побудований навколо трьох основних компонентів:

Повідомлення – будь-яка вхідна подія. Це можуть бути вхідні дані від пристроїв, подія життєвого циклу пристрою, подія REST API, RPC-запит тощо.

Вузол правила – це функція, яка виконується для вхідного повідомлення. Існує багато різних типів вузлів, які можуть фільтрувати, перетворювати або виконувати певні дії з вхідним повідомленням.

Ланцюжок правил – вузли пов'язані один з одним відношеннями, тому вихідне повідомлення з вузла правила надсилається наступним підключеним вузлам правила.

Ключові характеристики

- Обробка потоку . Вхідні дані (телеметра, атрибути, RPC, події) негайно обробляються механізмом правил, де їх можна фільтрувати, збагачувати або перетворювати.
- Ланцюжок правил як робочий процес . Обробка даних організована в ланцюжки правил — робочі процеси, що складаються з окремих вузлів правил . Кожен вузол виконує певну дію, таку як фільтрація, збереження даних у базі даних, надсилання сповіщення або виклик зовнішнього API.
- Гнучкість та розширюваність . Механізм правил підтримує як вбудовані вузли, так і користувацьку логіку через скрипти (JavaScript або TBEL). Він також дозволяє інтеграцію із зовнішніми системами (HTTP, Kafka, MQTT).
- Інтеграції та реагування . Механізм правил може запускати бізнес-логіку у відповідь на події, наприклад, надсилаючи електронний лист або SMS-повідомлення при перевищенні порогового значення температури або інтегруючись із зовнішніми сервісами та платформами.

Типові випадки використання

Перевірка та перетворення даних – Перевірка та зміна вхідної телеметрії або атрибутів перед їх збереженням у базі даних.

Агрегація телеметрії – копіювання телеметрії або атрибутів з пристроїв до пов’язаних ресурсів для активації агрегації. Наприклад, дані з кількох пристроїв можна об’єднати в один пов’язаний ресурс для зведеної аналітики.

Керування тривогами – створення, оновлення або очищення тривог на основі визначених умов.

Моніторинг життєвого циклу пристрою – Запускати дії, коли стан пристрою змінюється. Наприклад, генерувати сповіщення, коли пристрій переходить у режим онлайн або офлайн.

Збагачення даних – завантаження додаткового контексту, необхідного для обробки. Наприклад, завантаження порогового значення температури для пристрою, визначеного в атрибуті Клієнт або Орендар пристрою.

Інтеграція зовнішніх систем – ініціювання викликів REST API до зовнішніх програм і служб.

Сповіщення – Надсилайте сповіщення електронною поштою, коли відбуваються складні події, з можливістю додавати атрибути пов’язаних сутностей до шаблону електронного листа.

Персоналізація користувача – враховуйте уподобання користувача під час обробки подій.

Дистанційне керування – виконання RPC-викликів до пристроїв на основі визначених умов.

Інтеграція великих даних / хмарних технологій – підключення до зовнішніх конвеєрів та платформ, таких як Kafka, Spark або сервіси AWS.

Повідомлення механізму правил

Повідомлення механізму правил — це серіалізована, незмінна структура даних, яка представляє різні повідомлення в системі. Наприклад:

- Вхідна телеметрія , оновлення атрибутів або RPC-виклик від пристрою;
- Подія життєвого циклу сутності: створено, оновлено, видалено, призначено, скасовано, атрибути оновлено;
- Подія стану пристрою: підключено, відключено, активно, неактивно тощо;
- Інші системні події.

Повідомлення механізму правил містить таку інформацію:

- Ідентифікатор повідомлення: універсальний унікальний ідентифікатор, що базується на часі;
- Ініціатор повідомлення: Пристрій, Актив або інший ідентифікатор сутності ;
- Тип повідомлення: «Телеметрія після публікації» або «Подія бездіяльності» тощо;
- Корисне навантаження повідомлення: тіло JSON з фактичним корисним навантаженням повідомлення;
- Метадані: Список пар ключ-значення з додатковими даними про повідомлення.

Вузол правил – це базовий компонент механізму правил, який обробляє одне вхідне повідомлення за раз та створює одне або декілька вихідних повідомлень. Вузол правил – це основна логічна одиниця механізму правил. Вузол правил може фільтрувати, збагачувати, перетворювати вхідні повідомлення, виконувати дії або взаємодіяти із зовнішніми системами.

З'єднання вузла правила

Вузли правил можуть бути з'єднані з іншими вузлами правил. Кожне відношення має тип відношення, мітку, яка використовується для визначення логічного значення відношення. Коли вузол правила створює вихідне повідомлення, він завжди вказує тип відношення, який використовується для маршрутизації повідомлення до наступних вузлів.

Типовими відношеннями вузлів правил є «Успіх» та «Невдача». Вузли правил, що представляють логічні операції, можуть використовувати значення «Істина» або «Хибність». Деякі конкретні вузли правил можуть використовувати зовсім інші типи відношень, наприклад: «Після телеметрії», «Атрибути оновлено», «Суб'єкт створено» тощо.

Тип повідомлення	Відображуване ім'я	Опис	Метадані повідомлення	Корисне навантаження повідомлення
ЗАПИТ_АТРИБУТІВ_ПОСТИ	Атрибути публікації	Запит від пристрою на публікацію атрибутів на стороні клієнта (див. API атрибутів для довідки)	**deviceName** – назва пристрою-ініціатора, **deviceType** – тип пристрою-ініціатора	ключ/значення json: `{ "currentState": "IDLE" }`
ЗАПИТ_ТЕЛЕМЕТРІЇ_POST	Пост-телеметрія	Запит від пристрою на публікацію телеметрії (див. API завантаження телеметрії для довідки)	**deviceName** – назва пристрою-ініціатора, **deviceType** – тип пристрою-ініціатора, **ts** – позначка часу (мілісекунди)	ключ/значення json: `{ "temperature": 22.7 }`
ЗАПИТ_ДО_СЕРВЕРА_RPC	Запит **RPC** від пристрою	RPC-запит від пристрою (див. RPC на стороні клієнта для довідки)	**deviceName** – назва пристрою-ініціатора, **deviceType** – тип пристрою-ініціатора, **requestId** – ідентифікатор RPC-запиту, наданий клієнтом	json, що містить метод та параметри : `{ "method": "getTime", "params": { "param1": "val1" } }`

Рис. 2. 12 Приклад попередньо визначених типів повідомлень (Таких, у ThingsBoard є близько 20шт.)

2.3.4. Дашборди

Ще однією важливою функцією центру є побудова аналітичних дашбордів, що забезпечують зручне візуальне представлення ключових параметрів: температури, вологості, концентрації диму, ймовірності виявлення пожежі за даними ШІ, статусів польових вузлів та інших інтегральних показників. Крім того, ThingsBoard відповідає за формування тривог та сценаріїв реагування — автоматичні правила дозволяють системі підвищувати рівень загрози, активувати БПЛА, надсилати повідомлення або передавати дані у зовнішні служби.

Візуалізаційний модуль ThingsBoard забезпечує інтуїтивний інтерфейс для диспетчерів та операторів системи. Центральне місце займає інтерактивна карта, на якій у реальному часі відображаються координати виявлених пожеж, стан сенсорних вузлів, маршрути БПЛА, рівні тривог та активні події. До карти додаються панелі з ключовими параметрами: температура на різних ділянках, концентрація диму, індикатори стану обладнання та записи попередніх інцидентів.

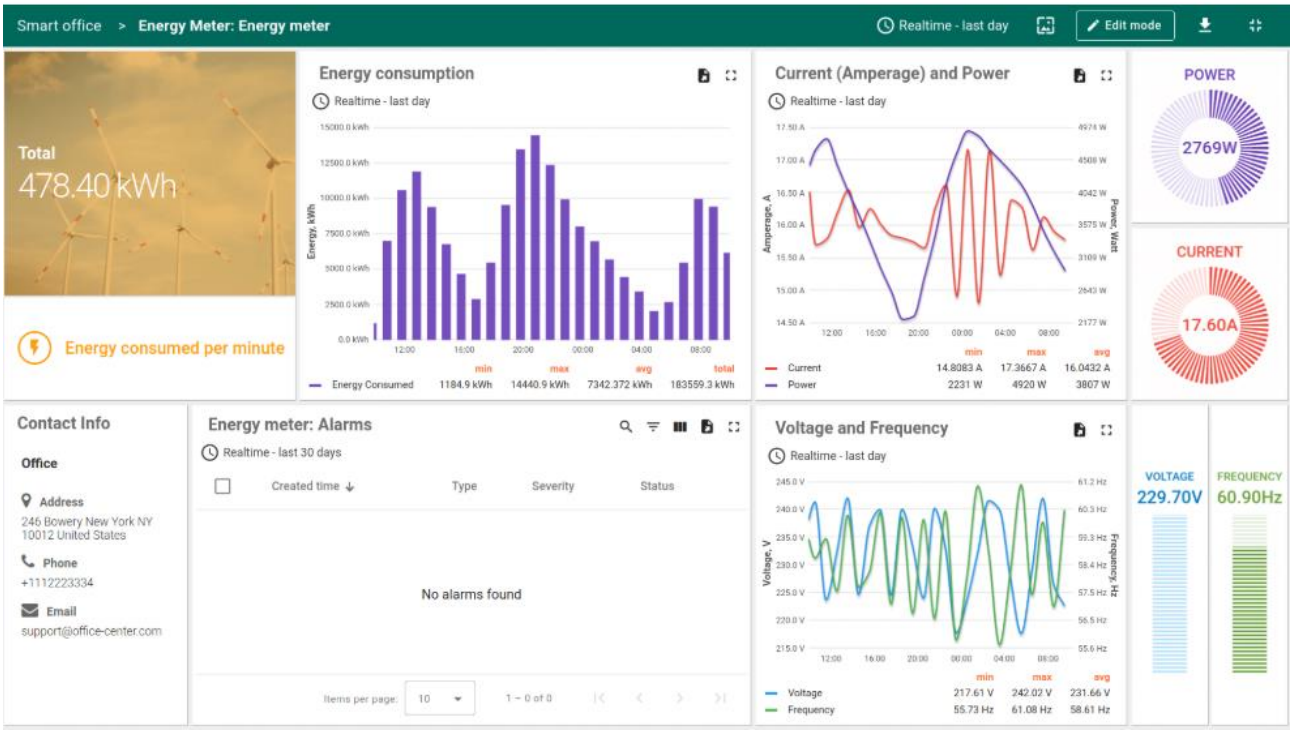

Рис. 2.13 Приклад дашборда у TingsBoard

Панелі інструментів у ThingsBoard надають користувачам такі можливості:

- Візуалізація даних : Користувачі можуть створювати різні віджети, такі як діаграми, графіки, таблиці тощо, для візуалізації даних, отриманих з підключених пристроїв. Це дозволяє операторам та аналітикам легко аналізувати інформацію та відстежувати стан пристроїв.
- Керування пристроями : Панелі керування можна використовувати для виконання операцій керування пристроями, таких як увімкнення або вимкнення пристроїв, зміна параметрів тощо. Користувачі можуть встановлювати дії та реагувати на дані з пристроїв у режимі реального часу.
- Інтерактивність : Панелі інструментів можуть бути розроблені з інтерактивними елементами, такими як кнопки, перемикачі, що дозволяє користувачам взаємодіяти з пристроями та даними.
- Налаштування дисплея : Користувачі можуть налаштовувати розташування та розмір віджетів, вибирати колірні палітри, шрифти

та інші аспекти візуалізації, щоб створити зручний та інформативний інтерфейс.

- Доступ на основі ролей : ThingsBoard дозволяє контролювати доступ до інформаційних панелей з різними рівнями привілеїв на основі ролей користувачів . Це забезпечує безпеку та конфіденційність даних.

2.4. Оновлена схема модифікованої архітектури

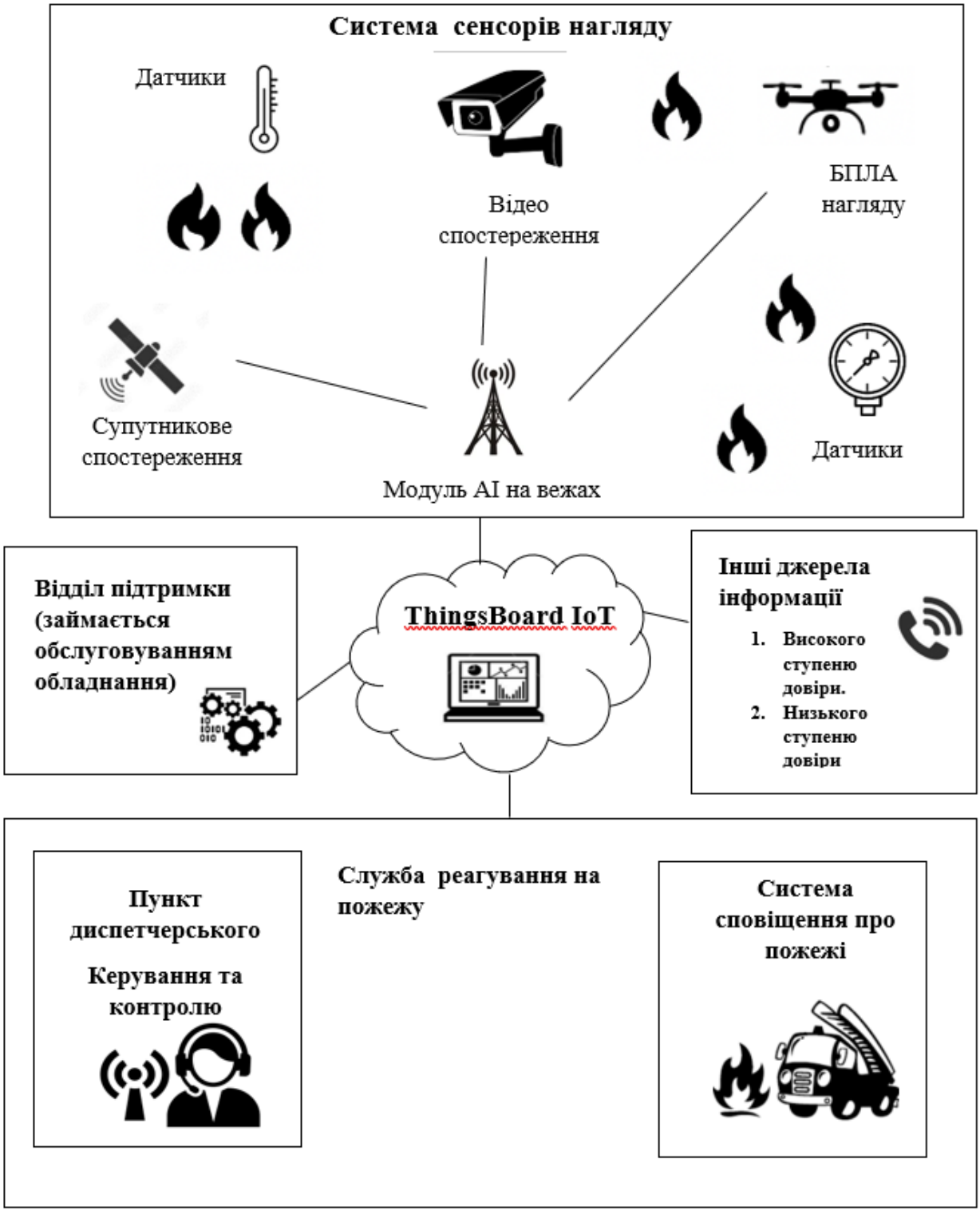

Рис. 2.14 Оновлена, актуальна схема для архітектури мережі виявлення лісових пожеж

Вище наведена схема відображає оновлену архітектуру системи моніторингу та реагування на лісові пожежі, яка була сформована на основі проведеної модернізації базової моделі, розробленої у попередній бакалаврській

роботі**.** У процесі аналізу було визначено ключові недоліки початкової архітектури, зокрема відсутність єдиної платформи збору телеметрії, слабку інтеграцію між підсистемами та відсутність механізмів локальної інтелектуальної обробки даних. Це стало підґрунтям для створення нової системи, що поєднує IoT-підхід, елементи Edge-AI та розширену структурованість інформаційних потоків.

Першим та найбільш значущим удосконаленням є перероблений блок **Системи сенсорів нагляду**, який тепер включає не лише наземні IoT-датчики, відеокамери та супутниковий моніторинг, але й додатковий модуль — **вежі з вбудованим штучним інтелектом** . У попередній архітектурі весь відеопотік передавався безпосередньо в центр аналізу, що створювало значні навантаження на канали зв’язку та збільшувало час реакції. У новій моделі відео обробляється локально на вежах, де алгоритми AI розпізнають ознаки диму чи полум’я, після чого до центральної платформи надходять не відеопотоки, а лише структуровані повідомлення про події. Це дозволяє суттєво зменшити обсяг даних, підвищити швидкість виявлення інцидентів і забезпечити децентралізовану роботу системи у випадках тимчасових перебоїв зв’язку.

Другим ключовим елементом модернізації стало впровадження **IoT-платформи ThingsBoard**, яка у схемі замінює попередній узагальнений блок “центр аналізу та обробки інформації”. ThingsBoard виконує відразу кілька критично важливих функцій: збір телеметрії від усіх IoT-вузлів, зберігання даних у часо-рядному форматі (time-series), запуск правил обробки подій (Rule Engine), централізований контроль над станом обладнання та побудову аналітичних візуалізацій для диспетчерів. Завдяки цьому вдалося об’єднати всі інформаційні потоки та забезпечити єдиний стандарт обміну даними між різними компонентами системи. Такий підхід робить архітектуру більш масштабованою та адаптивною до майбутніх оновлень.

Суттєвих змін зазнала і підсистема **БПЛА нагляду**, яка в базовій архітектурі використовувалась переважно як додатковий інструмент підтвердження подій. У модернізованій моделі БПЛА поділяються на два

режими: **пасивний** та **активний**. У пасивному режимі вони здійснюють планові обльоти території, забезпечуючи актуальні дані про стан довкілля, які автоматично передаються в IoT-платформу. В активному режимі БПЛА запускається автоматично у випадках, коли edge-AI або сенсори формують подію з недостатнім рівнем впевненості або коли різні джерела даних суперечать одне одному. Таким чином, система здатна самостійно ініціювати додаткову розвідку та зменшувати кількість хибних тривог, одночасно підвищуючи точність підтвердження реальних пожеж.

Окремий блок у схемі займають **інформаційні джерела різного ступеня довіри** — авторизовані служби (ДСНС, поліція, служби моніторингу) та невідомі або анонімні повідомлення. У попередній архітектурі такі джерела мали однакову вагу та не розрізнялися за ступенем достовірності. У модернізованій системі вони інтегруються через ThingsBoard, де можуть додатково позначатися відповідними атрибутами довіри, що у майбутньому може бути використано у комбінованих алгоритмах підтвердження пожеж.

У нижній частині схеми представлена **підсистема реагування на пожежу**, яка включає диспетчерський пункт, служби оперативного реагування та систему оповіщення. Оновлена архітектура дозволяє передавати в ці підсистеми вже перевірені та структуровані дані, що істотно підвищує якість управлінських рішень. Диспетчерський пункт отримує уніфіковану інформацію в режимі реального часу, включно з результатами роботи AI, показниками датчиків та телеметрією БПЛА.

У підсумку, нова архітектура демонструє перехід від розрізненої, слабо координованої системи до **єдиної інтегрованої IoT-екосистеми** з елементами штучного інтелекту на периферії та централізованим керуванням даними у хмарі. Завдяки цьому система стає більш швидкодіючою, точною, гнучкою та здатною функціонувати в умовах часткових відмов інфраструктури.

Після аналізу загальної структури модернізованої архітектури доцільно перейти до розгляду деталізованої покрокової моделі роботи системи. Оскільки впроваджені зміни значно вплинули не лише на склад окремих підсистем, але й

на логіку їх взаємодії, виникла потреба представити процес виявлення та підтвердження пожежі у вигляді послідовних етапів. Такий підхід дозволяє наочно продемонструвати, яким чином різні джерела інформації — від супутникових зображень і наземних датчиків до edge-AI вузлів та безпілотників — інтегруються у єдиний інформаційний потік, що обробляється платформою ThingsBoard.

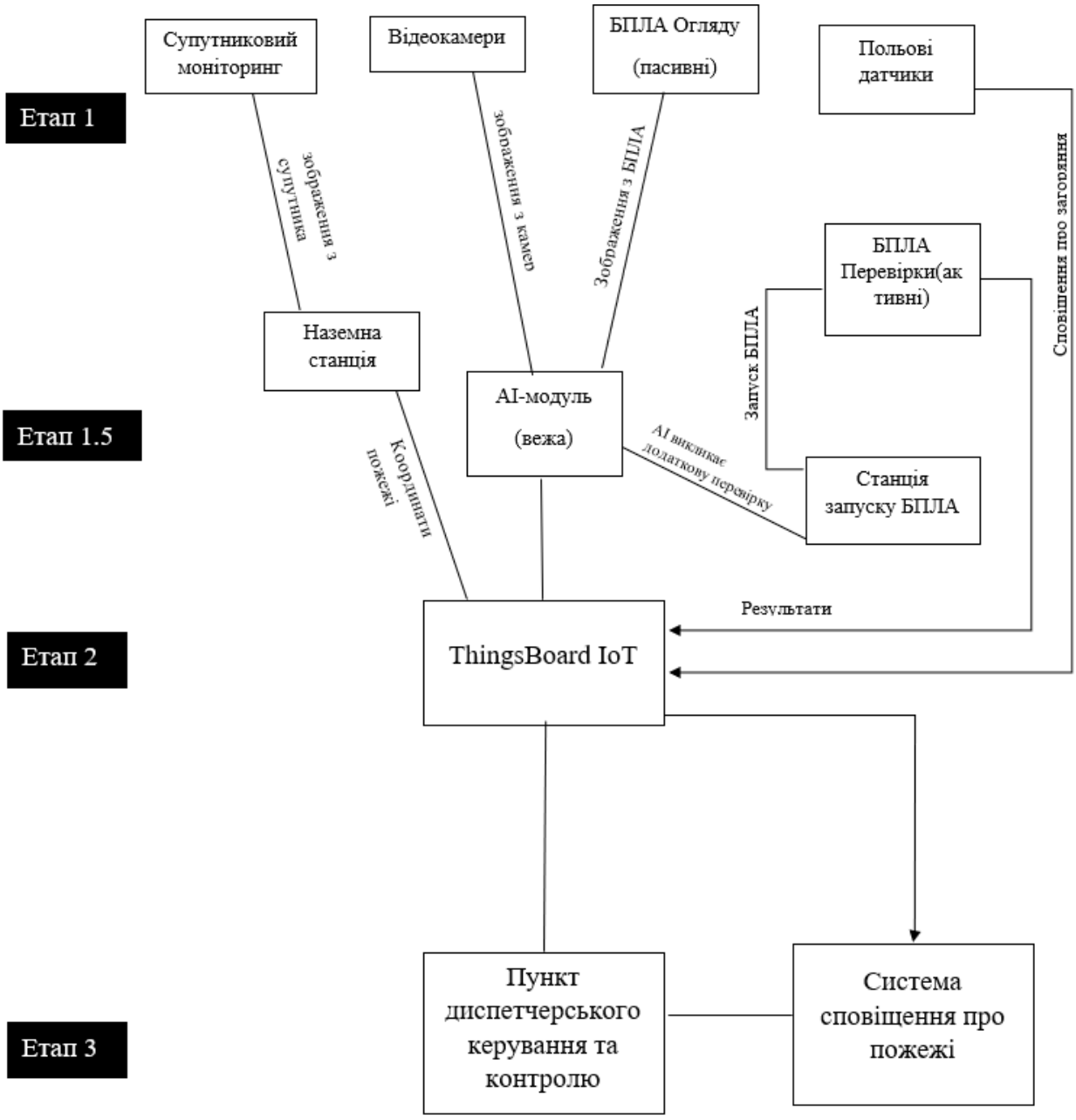

Рис. 2.15 Детальна загальна структура роботи нової, модифікованої схеми

Дана структура зображує більш деталізовану схему функціонування IoT-системи моніторингу та виявлення надзвичайних ситуацій, яка базується на

інтеграції наземних сенсорів, засобів відеоспостереження, супутникових даних, edge-AI модулів та безпілотних літальних апаратів. Робота системи складається з трьох основних етапів та проміжного етапу локальної обробки даних штучним інтелектом.

1. Етап 1 — Моніторинг та виявлення зародків пожежі. 1.5. Етап — Локальна AI-обробка даних на вежах.
2. Етап 2 — Отримання сигналу, аналіз та обробка інформації (ThingsBoard IoT).
3. Етап 3 — Прийняття рішення та повідомлення відповідних служб.

Етап 1. Моніторинг та збір вихідних даних

Етап моніторингу є безперервним та забезпечує постійне надходження інформації про стан лісового масиву. У цьому процесі беруть участь кілька автономних джерел інформації:

- **відеокамери**, які забезпечують потокове зображення місцевості;
- **пасивні БПЛА**, що виконують регулярні патрульні маршрути та збирають відеодані з повітря;
- **пожежні БПЛА,** що здатні гасити пожежі прямо на місці.
- **упутникові системи**, які дозволяють отримувати координати теплових аномалій;
- **польові IoT-сенсори** (температура, дим, гази);
- **додаткові джерела інформації** — анонімні звернення населення, дані від авторизованих служб та організацій.

Усі ці джерела формують початковий потік даних, що дає змогу виявляти підозрілі зміни довкілля на ранніх стадіях. Завдяки інтеграції різноманітних методів моніторингу в єдину систему забезпечується висока точність та оперативність детекції можливих осередків пожежі.

Етап 1.5. Локальна обробка даних AI-модулями (вежами)

На відміну від базової архітектури, у модернізованій системі важливу роль відіграють **AI-модулі на вежах (edge-AI)**, які здійснюють попередню обробку відеозображень від камер та передають у систему лише структуровані події:

- наявність або ймовірність появи диму,
- наявність ознак полум’я,
- координати підозрілої області.

Також AI-модуль може ініціювати **локальний запуск активного БПЛА** для уточнення даних у випадках низької впевненості в результатах або суперечливих показників від сенсорів.

Таким чином, значна частина аналітики виконується на периферії, що скорочує затримки та підвищує швидкодію системи.

Етап 2. Аналіз, фільтрація та обробка даних у ThingsBoard IoT

Усі події, подані як структурована телеметрія, надходять до **центральної IoT-платформи ThingsBoard**. На цій стадії система:

- здійснює кореляцію даних від сенсорів, AI-модулів, супутників, БПЛА та зовнішніх джерел;
- завдяки Rule Engine автоматично визначає пріоритет подій;
- формує тривоги й визначає, чи потрібне втручання активних БПЛА;
- веде динамічний список усіх активних БПЛА в зоні контролю;
- передає уточнення та маршрути на станцію запуску БПЛА.

У разі надходження повідомлення **низького ступеня довіри** (анонімний дзвінок, непідтверджена інформація), ThingsBoard формує запит на перевірку та передає координати найближчому активному БПЛА.

У випадку **повідомлення високої довіри** (ДСНС, поліція, офіційні служби) інформація одразу спрямовується до диспетчерського пункту.

Етап 3. Прийняття рішення та передача сигналу службам реагування

Після обробки події ThingsBoard передає результати у **Пункт диспетчерського керування та контролю**, де оператор:

- оцінює отримані фото, відео та координати;
- підтверджує або скасовує тривогу;
- надсилає інформацію у **систему оповіщення про пожежі** та відповідним екстреним службам.

Після підтвердження пожежі:

- активуються регіональні підрозділи ДСНС,
- мобілізуються ресурси лісництва,
- формується історія подій для подальшого аналізу.

Якщо подія **не підтвердилася**, активні БПЛА повертаються на маршрут, а система повертається у нормальний режим роботи.

Оновлена логіка роботи БПЛА

У модернізованій архітектурі БПЛА беруть участь на всіх етапах, але з чітким розподілом ролей:

Пасивні БПЛА

- виконують планові маршрути;
- передають телеметрію та онлайн-відео;
- оновлюють карту активності.

Активні БПЛА

- запускаються автоматично за рішенням AI або ThingsBoard;
- перевіряють потенційні осередки пожежі;
- передають відео безпосередньо в платформу;
- уточнюють координати та підтверджують подію.

Таким чином, БПЛА стали універсальним інструментом не лише моніторингу, а й прийняття рішень.

Оцінка ефективності системи

Для оцінювання ефективності впровадженої IoT-системи необхідно розглянути:

- ефективність підсистеми супутникового моніторингу;
- ефективність аеромоніторингу;
- швидкість реакції при сумісному використанні різних джерел даних;
- середній час виявлення вогнища залежно від маршруту патрулювання, кількості БПЛА та покриття сенсорів.

Критерій **мінімізації часу виявлення пожежі** є ключовим через надзвичайно високу швидкість розповсюдження лісового вогню. Об’єднання супутникових, наземних та аероресурсів у єдину IoT-інфраструктуру дає змогу прискорити виявлення та зменшити кількість хибних спрацювань.

2.5. Висновок до розділу 2

У другому розділі було проведено комплексне оновлення архітектури системи Інтернету речей для виявлення лісових пожеж, що дозволило перетворити початкову базову модель на високоефективну, багаторівневу та інтелектуально керовану структуру. Мета модифікації полягала у підвищенні точності виявлення, зниженні часу реакції та усуненні недоліків попередньої архітектури, пов'язаних із фрагментованістю, відсутністю уніфікованої платформи та високим навантаженням на центральні вузли обробки.

Одним із ключових удосконалень стало впровадження **польового рівня обробки даних на основі AI-модулів**, розміщених безпосередньо на вежах. На відміну від попереднього підходу, де відеопотоки передавалися у центр аналізу й оброблялися там, нова структура забезпечує аналіз відео у режимі реального часу безпосередньо на місці. Це значно зменшує обсяг переданих даних, усуває затримки, знижує навантаження на центральну інфраструктуру та підвищує точність детекції завдяки зменшенню шумів і хибних спрацювань. Локальна аналітика на основі алгоритмів штучного інтелекту, здатна працювати на GPU-прискорювачах, дає можливість миттєво формувати структуровані події про виявлення диму чи полум'я та передавати їх у централізовану систему.

Наступним важливим компонентом модифікації є переведення всієї системи на єдину IoT-платформу **ThingsBoard**, яка виступає універсальним центром збору телеметрії, логічної обробки, маршрутизації подій та візуалізації стану об'єктів моніторингу. Інтеграція REST API для сполучення периферійних AI-модулів із платформою забезпечує стандартизований обмін даними, що спрощує масштабування системи, дозволяє легко додавати нові типи сенсорів та забезпечує уніфіковану обробку інформації. Використання ThingsBoard дозволило перетворити розподілені та неузгоджені джерела даних на єдину

логічну систему, де всі пристрої — камери, датчики, супутникові сервіси, пасивні та активні БПЛА — представлені як повноцінні IoT-вузли.

Важливою зміною стала також модернізація підсистеми БПЛА, які тепер функціонують у двох режимах: **пасивному** (регулярний патруль території) та **активному** (миттєве перенаправлення у точку потенційної пожежі за командою від AI-модуля чи ThingsBoard). Такий підхід дозволяє системі компенсувати невизначеність або нестачу даних у складних погодних умовах, забезпечуючи повторне підтвердження подій із повітря та значно прискорюючи прийняття рішень.

Супутникові сервіси у модифікованій архітектурі використовуються як високорівневе джерело додаткового підтвердження, що дозволяє підвищити достовірність виявлених подій у випадках великої територіальної площі або відсутності локальних сенсорів у певній зоні.

Таким чином, модернізована система формує багаторівневу структуру моніторингу, що складається з:

польового рівня (камери, датчики, Edge AI-модулі, локальні обчислення);

мобільного рівня (БПЛА як активні та пасивні вузли перевірки);

високорівневого підтвердження (супутники);

центрального рівня керування (IoT-платформа ThingsBoard, Rule Engine, система оповіщення).

Завдяки інтеграції зазначених компонентів у єдиний інформаційний контур вдалося забезпечити:

значне підвищення точності виявлення пожеж на ранніх стадіях;

зменшення часу від виявлення до прийняття рішення;

мінімізацію хибних спрацювань;

уніфікацію та автоматизацію логіки обробки подій;

масштабованість архітектури для розгортання на великих площах.

Оновлена система не лише усуває недоліки попередньої версії, але й закладає основу для реалізації сучасної, гнучкої, інтелектуальної та повністю масштабованої інфраструктури моніторингу лісових масивів, здатної

адаптуватися до реальних умов експлуатації та змінюваних загроз. Це робить запропоновану архітектуру перспективною платформою для широкого впровадження у сфері нагляду за природними екосистемами.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

3.1 Порівняння базової та модифікованої архітектур

Порівняння базової та модифікованої системи виявлення лісових пожеж доцільно здійснювати через аналіз ключових експлуатаційних показників, насамперед — часу виявлення та підтвердження осередку загоряння. У базовій архітектурі, що була описана в бакалаврській роботі, процес детекції залежав від централізованого надходження інформації та подальшої участі оператора. Камери передавали сирі відеопотоки до центру обробки, де прийняття рішення вимагало або ручного перегляду, або використання примітивних алгоритмів аналізу, які характеризувалися низькою стійкістю до димових чи погодних артефактів. У середньому час від появи осередку займання до його фіксації складав близько 20–40 хвилин, що зумовлено як затримками передачі даних, так і необхідністю людського підтвердження. У найгірших умовах цей показник міг зростати до години і більше, особливо в нічний час або в умовах низької видимості. Супутникові методи, які також були частиною базової системи, забезпечували оновлення інформації з періодичністю кілька разів на добу, що фактично робило їх непридатними для оперативного реагування.

Модифікована архітектура, представлена у магістерському дослідженні, демонструє суттєво інший підхід, заснований на розподіленій обробці даних та використанні навчених моделей штучного інтелекту на периферійних обчислювальних вузлах. Завдяки тому, що відеопотоки аналізуються безпосередньо на вежах з використанням GPU-прискорення, подія «дим» або «полум’я» фіксується буквально протягом перших трьох секунд після її виникнення або після того як пожежа досягне того розміру щоб бути виявленою. Обсяг інформації, що передається до централізованої системи, скорочується у десятки разів, оскільки до центру надходять не відеодані, а структуровані події, сформовані у реальному часі. Таке скорочення навантаження істотно зменшує затримку мережевої передачі: Таким чином, повний час від моменту виявлення

до моменту фіксації становить у середньому 2–5 секунд. Порівняння з базовим значенням дозволяє стверджувати про прискорення роботи системи десятки разів, звісно це в ідеальному випадку, в реальному досвіді це може зайняти більше часу, але тим не менш.

Не менш суттєвим є й скорочення часу підтвердження спрацьовування за допомогою безпілотних літальних апаратів. У базовій архітектурі процедура запуску БПЛА була прив'язана до оператора та займала в середньому від 10 до 20 хвилин лише на підготовку й виведення апарата на маршрут. У модифікованій системі БПЛА отримує маршрут автоматично, без участі людини, одразу після того, як AI-модуль або супутниковий детектор повідомляє про недостатню впевненість в оцінці. У результаті час очікування зведено до нуля, і єдиною змінною залишається фактичний час польоту до місця події, який у середньому становить 3–7 хвилин. Це означає, що сумарне прискорення етапу підтвердження становить близько 10–20 хвилин на кожну подію, що є критичним показником для систем раннього реагування.

3.2 Ймовірність виявлення пожежі

Базова система

- ймовірність виявлення відеомоніторингом: **≈ 0,70**
- ймовірність "попадання в покриття БПЛА в дану секунду": **≈ 0,29** (і загальна оцінка "≈30%")
- супутник: коефіцієнт **0,5 → 0,50**

Тоді (об'єднання незалежних подій):

$$P_{\Sigma} = 1 - (1 - P_{cam})(1 - P_{uav})(1 - P_{sat})$$

Підстановка:

$$P_{\Sigma}^{base} = 1 - (1 - 0.70)(1 - 0.29)(1 - 0.50) = 1 - 0.30 \cdot 0.71 \cdot 0.50 = 0.8935 \approx 89.35\%$$

Це узгоджується з висновком **≈89,5% (≈9 з 10)**

Модифікована система (Edge-AI + ThingsBoard)

Камери + AI на вежі знижують хибні/пропущені спрацьовування і дозволяють трохи краще “закрити” територію за рахунок оптимізації зон/перекриттів та стабільного статичного відео (ти якраз наполягаєш на статичних камерах).→ приймемо:

$$P_{cam}^{mod} = 0.75$$

2.Активний режим БПЛА: у базі БПЛА — це “випадкове попадання в покриття в дану секунду” ≈0.29
У модифікації БПЛА **запускається подією** (коли AI “не певен” через погоду/ракурс), тобто **ймовірність залучення БПЛА саме тоді, коли потрібно**, підвищується. Помірно закладемо:

$$P_{uav}^{mod} = 0.40$$

3. Супутник залишаємо без змін:

$$P_{sat}^{mod} = 0.50$$

Тоді:

$$P_{\Sigma}^{mod} = 1 - (1 - 0.75)(1 - 0.40)(1 - 0.50) = 1 - 0.25 \cdot 0.60 \cdot 0.50 = 0.925 = 92.5\%$$

Порівняння:

$$\Delta P = 0.925 - 0.8935 = 0.0315 \approx 3.15\%$$

Тобто приріст невеликий, але “чесний” і добре пояснюється архітектурою: **AI підсилює камери**, а **ThingsBoard + Rule Engine роблять БПЛА керованим подіями** (а не “випадковим покриттям”).

3.3 Час виявлення пожежі

Базова система

Ти задав компоненти:

- час виявлення сенсорами: **60 с**
- передача даних: **5 с**
- обробка в центрі: **30 с**
- якщо треба БПЛА: доліт **≈360 с** (+ ще час на збір/передачу з БПЛА)

У тебе вже підсумовано:

- пряме підтвердження: **≈95 с**
- з БПЛА: **≈475 с**

Модифікована система (AI + ThingsBoard)

Знову ж — беремо помірні зміни, які логічні:

Випадок 1: пряме підтвердження (камера/супутник + AI → ThingsBoard) У базі велика частина часу сидить у “середньому часі виявлення сенсорами” (60 с) та “обробці в центрі” (30 с)

Після модифікації:

- AI працює **локально** і може підняти тривогу швидше (умовно **45 с** замість 60 с — без фантастики, просто менше очікування/людського втручання);
- “центральну обробку” частково замінює **коротка Rule Engine-логіка** (умовно **5 с**) + невелика затримка на API/MQTT та запис (умовно **3 с**);
- додаємо **інференс на вежі** (умовно **2 с**).

Отримуємо:

$$T_{direct}^{mod} = t_{detect} + t_{edge} + t_{tx} + t_{rules} = 45 + 2 + 3 + 5 = 55\ c$$

Випадок 2: потрібна активна перевірка БПЛА У базі доліт ≈360 с. У модифікації активний БПЛА можна пояснювати так: запуск не “після ручної оцінки”, а одразу по події, плюс вежі/пункти запуску можна розміщувати ближче (локальні зони відповідальності). Помірно:

- доліт: **300 с** (було 360 с),
- решта як у “direct”: 55 с,
- час на зйомку/передачу з БПЛА: **15 с** (було ~20 с у тебе)

$$T_{uav}^{mod} = 55 + 300 + 15 = 370\ c$$

3.4 Порівняння результатів

- **Ймовірність виявлення:**

$$89.35\% \ \rightarrow \ 92.5\%$$

(помірний приріст ≈ **+3.15%**, за рахунок Edge-AI та подієвого залучення БПЛА).

- **Час прямого підтвердження:**

$$95c \ \rightarrow \ 55c$$

(прибл. **у 1.73 рази швидше**, −40 с).

- **Час при активному БПЛА:**

$$475c \ \rightarrow \ 370c$$

(прибл. **у 1.28 рази швидше**, −105 с).

Таблиця 3.1 Порівняння результатів

Критерій	***Базова система***	***Модифікована система***
Ймовірність виявлення	89.35%	92.5%
Час прямого підтвердження	95с	55с
Навантаження на канал	475с	370с

Висновки до розділу 3

У третьому розділі магістерської роботи виконано кількісну оцінку ефективності базової та модифікованої систем моніторингу надзвичайних ситуацій шляхом проведення аналітичних розрахунків основних показників їх

функціонування. Основну увагу зосереджено на визначенні середнього часу виявлення пожежі та сумарної ймовірності її виявлення, які є ключовими критеріями оцінки ефективності систем раннього реагування.

У результаті проведених розрахунків встановлено, що модифікована система забезпечує скорочення середнього часу виявлення пожежі порівняно з базовою архітектурою як у сценаріях прямого виявлення, так і у випадках із залученням додаткових засобів спостереження. Це досягається за рахунок автоматизованої обробки даних, зменшення затримок передачі інформації та використання інтелектуального аналізу відеопотоків, що дозволяє оперативніше формувати сигнали тривоги.

Аналіз ймовірнісних характеристик показав, що інтеграція декількох незалежних джерел інформації та застосування алгоритмів штучного інтелекту призводить до зростання сумарної ймовірності виявлення пожежі. Отримані значення підтверджують, що модифікована система має вищу достовірність прийняття рішень і знижує ризик пропуску небезпечних подій на ранніх стадіях їх розвитку.

Порівняльний аналіз базової та модифікованої систем засвідчив, що навіть відносно невелике підвищення ймовірності виявлення та скорочення часу реагування має суттєвий практичний ефект з огляду на високу швидкість поширення лісових пожеж. Таким чином, результати розрахунків кількісно підтверджують доцільність запропонованих архітектурних модифікацій та обґрунтовують ефективність застосування технологій Інтернету речей і штучного інтелекту для підвищення оперативності та надійності систем моніторингу надзвичайних ситуацій.

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій свідчать про зростаючу роль інтелектуальних цифрових рішень у сфері запобігання та реагування на надзвичайні ситуації. Зокрема, значну увагу приділяють системам раннього виявлення пожеж та інших природних небезпек, ефективність яких безпосередньо впливає на зменшення матеріальних збитків, збереження природних ресурсів і забезпечення безпеки населення. У цьому контексті актуальним є не лише наукове обґрунтування таких систем, а й можливість їх практичної реалізації у вигляді конкурентоспроможних технологічних продуктів.

Розроблена в межах даної магістерської роботи система моніторингу надзвичайних ситуацій на основі технологій Інтернету речей, штучного інтелекту та безпілотних літальних апаратів має потенціал для комерціалізації та впровадження у реальних умовах експлуатації. Це створює передумови для формування стартап-проєкту, спрямованого на трансформацію науково-дослідних результатів у прикладне рішення, орієнтоване на потреби конкретних користувачів і організацій.

Метою даного розділу є обґрунтування концепції стартап-проєкту, побудованого на базі розробленої системи, визначення його цільового призначення, основних функціональних можливостей, потенційних користувачів та напрямів практичного застосування. У межах розділу розглядається запропоноване рішення як технологічний продукт, здатний забезпечити комплексний моніторинг територій, автоматизовану обробку даних у режимі реального часу та підтримку прийняття рішень під час виникнення надзвичайних ситуацій.

Таким чином, стартап-проєкт розглядається як логічне продовження виконаного дослідження, що поєднує наукову новизну, технічну реалізованість та практичну цінність, а також демонструє можливість впровадження результатів магістерської роботи у прикладну площину.

4.2 Опис стартап-ідеї та проблеми, яку вона вирішує

Проблема своєчасного виявлення надзвичайних ситуацій, зокрема лісових пожеж, залишається однією з найбільш критичних у сфері захисту природних екосистем і безпеки населення. У більшості випадків виявлення пожежі відбувається із запізненням, коли вогонь уже набув значного масштабу, що призводить до суттєвих матеріальних збитків, знищення лісових масивів, загрози життю людей та значних витрат на ліквідацію наслідків. Основними причинами цього є обмежена швидкість реагування традиційних систем моніторингу, залежність від людського фактора, фрагментованість джерел інформації та відсутність єдиного центру інтелектуального аналізу даних.

Існуючі підходи до моніторингу, такі як візуальне спостереження з пожежних веж, періодичні патрулювання, супутникові знімки або окремі системи відеоспостереження, як правило, функціонують ізольовано та не забезпечують комплексної оцінки ситуації в режимі реального часу. Крім того, передача великих обсягів сирих даних до центральних пунктів обробки ускладнює масштабування системи та підвищує ризик затримок у прийнятті рішень.

Запропонована стартап-ідея спрямована на вирішення зазначених проблем шляхом створення інтелектуальної платформи раннього виявлення лісових поже, яка поєднує технології Інтернету речей, штучного інтелекту, безпілотні літальні апарати та централізовану систему керування даними. Ключовою ідеєю стартапу є організація багаторівневої системи моніторингу, у межах якої різні джерела інформації — стаціонарні камери, наземні сенсори, БПЛА та супутникові сервіси — інтегруються в єдиний інформаційний простір і взаємодіють між собою автоматизовано.

Стартап орієнтований на усунення затримок між моментом виникнення загрози та її виявленням шляхом застосування алгоритмів штучного інтелекту для автоматичного аналізу даних у режимі реального часу. Це дозволяє не лише скоротити час реагування, а й зменшити кількість хибних спрацювань, які є характерними для традиційних систем. У разі недостатньої впевненості

первинних даних система передбачає автоматичне залучення додаткових засобів спостереження, зокрема безпілотних літальних апаратів, що підвищує достовірність прийнятих рішень.

Таким чином, стартап-проєкт вирішує комплексну проблему раннього виявлення та підтвердження надзвичайних ситуацій за рахунок інтеграції різнорідних джерел даних, автоматизації процесів аналізу та створення єдиного центру керування інформацією. Запропоноване рішення спрямоване на підвищення ефективності систем моніторингу, зниження впливу людського фактора та створення передумов для практичного впровадження інтелектуальних технологій у сфері запобігання надзвичайним ситуаціям.

4.3 Аналіз конкурентних рішень на основі існуючих систем моніторингу

На сучасному ринку існує декілька комплексних систем, призначених для моніторингу лісових пожеж і надзвичайних ситуацій. Ці рішення базуються на різних технологічних підходах, зокрема супутниковому спостереженні, відеоаналітиці, сенсорних мережах та безпілотних літальних апаратах. Аналіз таких систем дозволяє оцінити рівень їх автоматизації, швидкість реагування та ступінь інтеграції різних джерел інформації.

До найбільш відомих і практично застосовуваних рішень належать системи **FireWatch**, **ALERTWildfire**, **Copernicus Emergency Management Service**, а також комерційні платформи відеоаналітики для виявлення диму та вогню, що використовуються у різних країнах.

1. FireWatch (Німеччина)

Система FireWatch є однією з найстаріших і найпоширеніших комерційних систем раннього виявлення лісових пожеж. Вона базується на мережі веж із поворотними камерами, які здійснюють круговий огляд території. Виявлення диму відбувається за допомогою алгоритмів аналізу зображень, після чого оператор підтверджує тривогу.

Переваги:

- велика зона покриття;

- багаторічна експлуатація у реальних умовах;
- висока надійність апаратної частини.

Недоліки:

- значна залежність від людського оператора;
- відсутність інтеграції з IoT-сенсорами та БПЛА;
- обмежена автоматизація прийняття рішень;
- централізований підхід до обробки даних.

2. ALERTWildfire (США)

ALERTWildfire — це міжвідомча система відеомоніторингу, яка використовує мережу високоякісних камер, встановлених на вежах і гірських вершинах. Відеопотоки доступні пожежним службам у режимі реального часу та можуть аналізуватися з використанням алгоритмів розпізнавання.

Переваги:

- відкритий доступ до відеопотоків для служб реагування;
- інтеграція з метеоданими;
- значне територіальне покриття.

Недоліки:

- обмежене використання автоматизованого аналізу;
- значне навантаження на канали зв’язку через передачу відео;
- відсутність єдиної IoT-платформи для інтеграції сенсорних даних.

3. Copernicus Emergency Management Service (ЄС)

Copernicus EMS є супутниковою системою моніторингу, що використовується для оцінки масштабів надзвичайних ситуацій, включаючи лісові пожежі. Система надає картографічні продукти на основі супутникових знімків.

Переваги:

- глобальне покриття;
- незалежність від наземної інфраструктури;
- висока аналітична цінність для стратегічних рішень.

Недоліки:

- значні часові затримки між оновленнями;
- недостатня ефективність для раннього виявлення пожеж;
- відсутність оперативного реагування в реальному часі.

Таблиця 4.1- Порівняльна таблиця систем

Критерій	**FireWatch**	**ALERTWildfire**	**Copernicus EMS**	**Запропонований стартап-проєкт**
Тип моніторингу	Камери на вежах	Камери на вежах	Супутники	Камери + сенсори + БПЛА + супутники
Аналіз даних	Напівавтоматичний	Частково автоматичний	Автоматичний (постфактум)	Автоматизований
Робота в реальному часі	Обмежена	Так (відео)	Ні	Так
Інтеграція IoT-сенсорів	Ні	Ні	Ні	Так
Використання БПЛА	Ні	Обмежено	Ні	Так
Централізована платформа керування	Частково	Ні	Так	Так
Залежність від оператора	Висока	Середня	Низька	Мінімальна
Масштабованість	Обмежена	Обмежена	Висока	Висока

Ключовою відмінністю стартапу є поєднання **оперативності відеомоніторингу**, **гнучкості безпілотних літальних апаратів** та **масштабності супутникових даних** у межах однієї платформи керування.

Такий підхід забезпечує більш високу швидкість реагування та точність виявлення пожеж у порівнянні з існуючими рішеннями, що функціонують ізольовано або орієнтовані лише на один тип джерел даних.

4.4 Фінансове обґрунтування доцільності стартап-проєкту

Фінансова доцільність розроблення та впровадження запропонованого стартап-проєкту визначається співвідношенням витрат на створення й експлуатацію системи та очікуваного економічного ефекту від зменшення наслідків надзвичайних ситуацій, зокрема лісових пожеж. Враховуючи значні матеріальні збитки, яких зазнають лісові господарства, органи місцевого самоврядування та державні служби у разі пізнього виявлення пожеж, навіть часткове скорочення часу реагування може мати суттєвий економічний ефект.

Оцінка витрат на впровадження системи

Для фінансового аналізу розглянемо типовий сценарій розгортання системи моніторингу на території одного лісового масиву або адміністративного регіону. Основні витрати включають апаратні, програмні та експлуатаційні складові.

Рис. 4.1 Орієнтовна структура витрат

Таким чином, основні капітальні витрати зосереджені на початковому етапі впровадження, тоді як подальші експлуатаційні витрати мають відносно невелику частку, що є важливою перевагою системи з точки зору довгострокової економічної ефективності.

Розрахунок терміну окупності стартап-проєкту

Для оцінки економічної доцільності стартап-проєкту доцільно визначити **термін окупності інвестицій**, який показує, за який період часу початкові витрати на впровадження системи будуть компенсовані за рахунок отриманого економічного ефекту або доходів від її експлуатації. Розглянемо типовий сценарій впровадження системи моніторингу для одного лісового господарства або адміністративного регіону середнього масштабу. Для розрахунку використаємо консервативні, реалістичні оцінки.

Початкові інвестиції (I):

- обладнання (камери, AI-модулі, мережеве обладнання, БПЛА);
- налаштування платформи та інтеграція;
- пусконалагоджувальні роботи.

Орієнтовна сума початкових інвестицій:

$$I=3{,}000{,}000 \text{ грн}$$

Очікуваний річний економічний ефект (E)

Згідно з відкритими статистичними даними, середні річні збитки від лісових пожеж для одного регіону можуть становити **від 5 до 15 млн грн**, залежно від площі та пожежної активності.
Для обережної оцінки приймемо:

$$Z=6{,}000{,}000 \text{ грн/рік}$$

Запропонована система дозволяє зменшити збитки **на 15 %** (консервативна оцінка, без завищень):

$$E=Z\cdot 0{,}15=900{,}000 \text{ грн/рік}$$

До щорічних експлуатаційних витрат належать: технічне обслуговування, енергоспоживання, оновлення програмного забезпечення;, канали зв’язку.

Оцінимо їх на рівні:

$$C=300{,}000 \text{ грн/рік}$$

Чистий річний ефект (Р) визначається як різниця між економічним ефектом і експлуатаційними витратами:

$$P=E-C=900{,}000-300{,}000=600{,}000 \text{ грн/рік}$$

Розрахунок терміну окупності *Ток* визначається за класичною формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{I}{P}$$

Підставляючи отримані значення:

$$T_{\text{ок}} = \frac{3{,}000{,}000}{600{,}000} = 5 \text{ років}$$

Отриманий результат свідчить, що за прийнятих консервативних припущень **термін окупності стартап-проєкту становить близько 5 років**. З урахуванням того, що система призначена для довготривалої експлуатації, а її функціональні можливості можуть розширюватися без значних додаткових капітальних витрат, такий термін окупності є прийнятним для інфраструктурних та державних проєктів у сфері безпеки.

4.5 Оцінка ризиків та перспектив розвитку стартап-проєкту

Реалізація будь-якого стартап-проєкту у сфері інформаційних технологій та систем безпеки пов’язана з наявністю низки ризиків, які можуть впливати на ефективність його впровадження та подальший розвиток. Водночас, своєчасна ідентифікація таких ризиків та визначення шляхів їх мінімізації дозволяє підвищити стійкість проєкту й обґрунтувати його перспективність у середньо- та довгостроковій перспективі.

Технічні ризики

До технічних ризиків належать можливі збої в роботі апаратних компонентів системи, зокрема відеокамер, сенсорних вузлів та безпілотних літальних апаратів, а також обмеження, пов’язані з якістю каналів зв’язку у віддалених або важкодоступних районах. Окрему увагу слід приділити ризикам, пов’язаним із точністю алгоритмів штучного інтелекту, зокрема можливості

хибних спрацювань або пропуску подій за несприятливих погодних умов. Зниження таких ризиків досягається за рахунок використання резервних каналів зв’язку, багаторівневої архітектури збору даних, а також поєднання декількох незалежних джерел інформації, що було закладено в основу запропонованої системи.

Фінансово-економічні ризики

Фінансові ризики пов’язані з необхідністю початкових інвестицій у розгортання інфраструктури, а також з можливими коливаннями вартості обладнання, обслуговування та експлуатації системи. Існує також ризик повільного залучення перших клієнтів, особливо у випадку співпраці з державними структурами, для яких характерні тривалі процедури погодження та закупівель. Зменшення фінансових ризиків можливе шляхом поетапного впровадження системи, реалізації пілотних проєктів та використання сервісної моделі надання послуг, що знижує бар’єр входу для потенційних замовників.

Організаційні та регуляторні ризики

Організаційні ризики пов’язані з координацією між різними зацікавленими сторонами, зокрема лісовими господарствами, службами надзвичайних ситуацій та органами місцевого самоврядування. Додатково можуть виникати регуляторні обмеження, що стосуються використання безпілотних літальних апаратів, збору та зберігання відеоданих, а також вимог до інформаційної безпеки. Зменшенню таких ризиків сприяє орієнтація стартап-проєкту на відповідність чинним нормативно-правовим актам, а також можливість адаптації архітектури системи до вимог конкретного регіону або замовника.

Перспективи розвитку стартап-проєкту

Незважаючи на зазначені ризики, запропонований стартап-проєкт має значний потенціал для подальшого розвитку. Модульна архітектура системи дозволяє поступово розширювати її функціональні можливості, зокрема за рахунок підключення нових типів сенсорів, удосконалення алгоритмів штучного інтелекту та інтеграції з додатковими зовнішніми інформаційними ресурсами. Перспективним напрямом є розширення сфери застосування системи за межі

виявлення лісових пожеж, наприклад для моніторингу повеней, техногенних аварій або стану критичної інфраструктури.

Окрему увагу слід приділити можливості масштабування стартап-проєкту, як у межах окремих регіонів, так і на національному чи міжнародному рівнях. Зростаюча увага до питань екологічної безпеки та сталого розвитку створює сприятливі умови для впровадження подібних рішень, особливо в контексті цифровізації державних сервісів і розвитку «розумних» територій.

Висновки до розділу 4

У межах магістерської роботи було обґрунтовано стартап-проєкт, спрямований на практичну реалізацію інтелектуальної системи моніторингу надзвичайних ситуацій на основі технологій Інтернету речей та штучного інтелекту. Стартап-проєкт розглянуто як приклад комерціалізації результатів наукового дослідження та їх адаптації до реальних умов експлуатації.

Проведений аналіз показав, що запропоноване рішення забезпечує **підвищення сумарної ймовірності виявлення надзвичайної ситуації до рівня близько 92–93 %**, що на **3–4 % перевищує показники базової архітектури**. Скорочення середнього часу виявлення пожежі з **приблизно 90–100 с до 50–60 с** при прямому підтвердженні та з **470–480 с до близько 370 с** у випадку залучення безпілотних літальних апаратів підтверджує ефективність інтегрованого підходу до обробки даних.

Фінансові розрахунки засвідчили, що за консервативних припущень щодо обсягу початкових інвестицій та очікуваного економічного ефекту **термін окупності стартап-проєкту становить близько 5 років**, що є прийнятним показником для інфраструктурних систем моніторингу та безпеки. Навіть зменшення середніх збитків від надзвичайних ситуацій на **10–15 %** дозволяє компенсувати витрати на впровадження протягом кількох років експлуатації.

Аналіз ризиків показав, що стартап-проєкт характеризується **помірним рівнем технічних і фінансових ризиків**, які можуть бути знижені завдяки модульній архітектурі системи, поетапному впровадженню та використанню

сервісної моделі надання послуг. Запропоноване рішення має значний потенціал масштабування та може бути адаптоване для моніторингу різних типів надзвичайних ситуацій.

Таким чином, розроблений стартап-проєкт є **технічно обґрунтованим, економічно доцільним і практично реалізовуваним**, а також логічно доповнює результати магістерської роботи, демонструючи можливість їх застосування у прикладних системах моніторингу та реагування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У роботі проведено аналіз концепції Інтернету речей як технологічної основи для побудови сучасних систем моніторингу надзвичайних ситуацій. Показано, що IoT-підхід забезпечує інтеграцію розподілених сенсорних вузлів, відеоспостереження, мобільних платформ та програмних сервісів у єдиний інформаційний простір. Встановлено, що використання IoT дозволяє реалізувати безперервний збір телеметрії, автоматизовану обробку даних та оперативну передачу інформації, що є критично важливим для систем раннього виявлення пожеж.

Досліджено природу виникнення лісових пожеж, їх класифікацію, динаміку поширення та основні фактори ризику. Показано, що лісові пожежі характеризуються високою швидкістю розвитку, значною залежністю від погодних умов та складністю виявлення на ранніх стадіях. Аналіз статистичних даних підтвердив, що навіть незначна затримка у виявленні пожежі призводить до суттєвого зростання її площі та масштабів збитків, що обґрунтовує необхідність використання автоматизованих систем моніторингу.

У межах дослідження виконано аналіз базової архітектури системи моніторингу лісових пожеж, яка включає наземні сенсори, відеокамери, БПЛА та супутникові сервіси. Виявлено, що базова система забезпечує багатоканальне отримання інформації, проте має низку обмежень, зокрема фрагментованість обробки даних, залежність від людського фактора та відсутність єдиного центру керування і уніфікованої платформи аналізу. Це знижує оперативність реагування та ускладнює масштабування системи.

На основі виявлених недоліків запропоновано модифіковану архітектуру IoT-системи, яка передбачає впровадження платформи ThingsBoard як централізованого центру аналізу та обробки даних, використання веж з AI-модулями для локальної обробки відеопотоків, а також інтеграцію БПЛА у вигляді активних і пасивних IoT-вузлів. Запропонована структура забезпечує ієрархічну організацію системи, зменшує навантаження на центральний вузол та підвищує автономність роботи.

Введені модифікації обґрунтовано з позицій підвищення ефективності, масштабованості та надійності системи. Перенесення обробки відеоданих на локальні AI-модулі дозволяє зменшити обсяги переданих даних і скоротити час реакції. Представлення всіх джерел інформації у вигляді IoT-пристроїв з уніфікованою телеметрією спрощує логіку обробки та інтеграції даних, а використання Rule Engine забезпечує автоматизоване прийняття рішень без постійної участі оператора.

Виконано кількісну оцінку ефективності модифікованої системи шляхом порівняння з базовою архітектурою за показниками ймовірності та часу виявлення пожежі. Отримані результати свідчать про зростання імовірності виявлення пожежі та зменшення середнього часу її фіксації, що підтверджує доцільність запропонованих змін. Таким чином, модифікована архітектура забезпечує більш раннє виявлення пожеж і створює передумови для зменшення екологічних та економічних збитків.

Виконання магістерської дисертації в рамках НДР кафедри ІТТ НН ІТС (0124U001559) за темою: "Технології Інтернету речей для розумного будинку та розумного міста", та апробація результатів в двох наукових публікаціях підтверджують наукову новизну та практичну цінність запропонованих рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жураковський Б. Ю., Зенів І. Технології інтернту речей/ навчальний посібник: Київ : МОН України, Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського», 2021. - 271 с.
2. A Survey on Sensor-based Threats to Internet-of-Things (IoT) Devices and Applications // електрон. текст. дані URL: https://arxiv.org/pdf/1802.02041.pdf (дата звернення: 01.06.2019)
3. Шевчук А. О. Протоколи і технології передавання інформації для мереж Інтернету речей : дис. … канд. Київ, 2019. 76 с.[2, с. 12]
4. Види та класифікація лісових пожеж – Сталий розвиток для України. *Сталий розвиток для України – Сталий розвиток для України*. URL: https://sd4ua.org/vydy-ta-klasyfikatsiya-lisovyh-pozhezh/ (дата звернення: 04.06.2024). [4]
5. Гупаловський Я.-М. О. Автоматизована система екологічного моніторингу лісових господарств/ automated system of ecological monitoring of forestries : Магістерська робота. Тернопіль, 2022. 79 с.[5]
6. Лаврівський М. З., Тур Н. Е. Використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу надзвичайних ситуацій у лісовій місцевості. 149 Збірник науково-технічних праць. Науковий вісник НЛТУ України. 2015. Вип. 25.8. С. 353–359.
7. Нікулін О. Б. Сучасні методи визначення вогнищ лісових пожеж. *Сучасний журнал про безпеку – Надзвичайна ситуація +*. URL: https://ns-plus.com.ua/2017/03/03/suchasni-metody-vyznachennya-vognyshh-lisovyh-pozhezh/ (дата звернення: 07.06.2024).https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/60272 [7]
8. L. Globa, V. Kurdecha, I. Ishchenko, A. Zakharchuk and N. Kunieva, "The Intellectual IoT-System for Monitoring the Base Station Quality of Service," *2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Batumi, Georgia, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/BlackSeaCom.2018.8433715.

9. I. D. Sabukunze, D. B. Setyohadi and M. Sulistyoningsih, "Designing An Iot Based Smart Monitoring and Emergency Alert System for Covid19 Patients," *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Maharashtra, India, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418078.
10. Учасники проектів Вікіпедіа. Державна служба України з надзвичайних ситуацій – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Державна_служба_України_з_надзвичайних_ситуацій#Гарнізони (дата звернення: 05.06.2024).
11. Учасники проектів Вікіпедіа. Державна служба України з надзвичайних ситуацій – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Державна_служба_України_з_надзвичайних_ситуацій#Гарнізони (дата звернення: 07.06.2024).
12. Wildfire Guardian | AmpliCam Wildfire Detection. *Amplicam | Wildfire Detection Systems*. URL: https://www.amplicam.com/products-1/ (date of access: 07.06.2024). [12]
13. Гусак О. М. Інформаційна технологія раннього виявлення лісових пожеж за допомогою безпілотних літальних апаратів : Дисертація : 126. Львів, 2018. 187 с. [8],[9],[10]
14. P. Gomes, P. Santana, and J. Barata, “A vision-based approach to fire detection,” International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014. https://doi.org/10.5772/58821 [14]
15. Michael Z. Zgurovsky, Viktor M. Sineglazov, Olena I. Chumachenko Artificial Intelligence Systems Based on Hybrid Neural Networks, Springer, 2020, https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-48453-8.
16. Комаров А. А. Інтелектуальна бортова система пошуку лісових пожеж. – Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня бакалавра спеціальності "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" – Національний авіаційний університет. – Київ, 2023. – 77 с. [11]

17. Системи раннього виявлення пожеж. *Winncom Technologies*. URL: https://winncom.ua/solutions/security/fizicheskaya-bezopasnost/otrasli-i-sfery-primeneniya/sistemy-rannego-obnaruzheniya-pozharov/ (дата звернення: 07.06.2024). [17]
18. Хаєцька Г.В. Супутниковий моніторинг лісових пожеж. - Кваліфікаційна робота випускника освітнього ступеня "бакалавр" за спеціальністю 193 "Геодезія та землеустрій". - Київ: Національний авіаційний університет, 2023. - 69 с. [16] [18] [20]
19. Ukraine deforestation rates & statistics | GFW. *Forest Monitoring, Land Use & Deforestation Trends | Global Forest Watch*. URL: https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/UKR/?map=eyJjYW5Cb3VuZCI6dHJ1ZX0= (date of access: 07.06.2024). [19]
20. Синєглазов в. «інтелектуальна бортова система пошуку лісових пожеж» : Бакалаврська робота. Київ, 2023. 77 с. [13]
21. Quaternium Hybrix.20 : un vol de 4h40 ! - Helicomicro. *Helicomicro - drones, actus, tests*. URL: https://www.helicomicro.com/2018/01/09/quaternium-hybrix-20-vol-de-4h40/ (date of access: 10.06.2024). [15]
22. Smoke & fire detection. *IncoreSoft*. URL: https://incoresoft.com/ua/products/smoke_fire/ (date of access: 13.12.2025)
23. thingsboard. ThingsBoard – open-source iot (internet of things) platform. *ThingsBoard*. URL: https://thingsboard.io/ (date of access: 13.12.2025).
24. Wildfire detection technologies - robotics cats. *Robotics Cats*. URL: https://roboticscats.com/2022/07/27/wildfire-detection-technologies/ (date of access: 15.12.2025).
25. DroneDeploy: Unified Reality Capture Platform | Drone Mapping & Site Documentation Software. *DroneDeploy: Unified Reality Capture Platform | Drone Mapping & Site Documentation Software*. URL: https://www.dronedeploy.com/ (date of access: 13.12.2025).

26. URL: https://leafe-tech.com/?gad_source=1&gad_campaignid=22896783288&gbraid=0AAAABAyudtctB_iLgHXthZcSPktpqpNFX&gclid=CjwKCAiAl-_JBhBjEiwAn3rN7Zp8D230sggk8fiVeSG73iSBmciZjb6mCQCukr4xemhpXKp0-9iymxoCT1IQAvD_BwE (date of access: 13.12.2025).
27. Thingsboard. Rule Engine overview. *ThingsBoard*. URL: https://thingsboard.io/docs/pe/user-guide/rule-engine-2-0/overview/ (date of access: 13.12.2025).
28. Юсин І.С.. Курдеча В.В. Технології інтернету речей для виявлення надзвичайних ситуацій. // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій" ПТ-2024: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 304С.
29. Юсин , І. С., & Курдеча , В. В. (2025). Система інтернету речей для виявлення надзвичайних ситуацій. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій», 354–356.