

# КАРТА ВІДОБРАЖЕННЯ СТАНУ АБО ПОТОЧНОЇ СИТУАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ АКУСТИЧНОЇ СЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ

*Антон Кіцера, аспірант, Олексій Сечко, аспірант, Роман Кочан, д.т.н., проф.  
Національний університет «Львівська політехніка», Україна  
e-mail: antonkitsera@gmail.com, sechko.a@gmail.com, roman.v.kochan@lpnu.ua*

## Анотація

Дослідження зосереджено на створенні програмного забезпечення для інтерактивної карти, яка відображає повітряне середовище на основі даних, зібраних з розподіленої системи акустичних сенсорів. Ця розробка спрямована на підвищення оборонних можливостей України в умовах війни та відкриває перспективи для подальших досліджень у цій галузі. Карта дозволяє операторам аналізувати інформацію про переміщення повітряних цілей у режимі реального часу, що є важливим для прийняття швидких та обґрунтованих рішень у сфері оборони та безпеки. Розробка цієї системи також відкриває перспективи для майбутніх досліджень, таких як розширення функціональних можливостей карти, інтеграція з іншими системами та подальша оптимізація роботи акустичних сенсорів. Наша робота спрямована на забезпечення національної безпеки та оборонного потенціалу України.

## Ключові слова

Акустичні сенсори, система сенсорів, програмне забезпечення, обробка даних, інформаційна система, акустичний моніторинг

## 1. Вступ

Україна, яка з 24 лютого 2022 року перебуває у стані повномасштабної війни з РФ, стоїть перед складними і надзвичайно важливими завданнями щодо забезпечення національної безпеки та захисту свого населення. Ситуація, коли ворог використовує крилаті ракети, балістичні ракети та дрони-камікадзе [1], створює серйозну загрозу, яка вимагає від нас розробки та впровадження найсучасніших методів моніторингу та прогнозування повітряної обстановки.

В інтерв'ю The Economist головнокомандувач Збройних сил України Валерій Залужний вказав на системний ризик, пов'язаний з дронами: «Російські дрони перебрали на себе значну частину функцій пілотованої авіації в плані розвідки та повітряних ударів» [2].

Одним із найактуальніших завдань є забезпечення надійного та оперативного контролю повітряного простору, виявлення та відстеження потенційних загроз і небезпек у цій сфері. Саме в такому складному контексті виникає потреба у розробці та впровадженні інноваційних систем, здатних надавати інформацію про повітряну обстановку в режимі реального часу.

Надання оперативної та точної інформації про поточну ситуацію та рух повітряних об'єктів стає критично важливим завданням. Традиційні методи спостереження та розвідки мають свої обмеження, особливо коли супротивник використовує тактику мінімізації радіолокаційної та візуальної видимості.

У цьому контексті зростає важливість акустичних сенсорів, оскільки звук стає однією з ключових інформативних характеристик, які можна використовувати для виявлення та класифікації об'єктів у повітрі. Акустичні сенсори можуть стати надійним джерелом інформації в умовах, коли інші засоби спостереження стають менш ефективними.

## 2. Огляд літературних джерел

На даний час існує кілька різних підходів до виявлення повітряних цілей в умовах війни. Радіолокаційні системи [3] використовують електромагнітні хвилі для пошуку та визначення координат цілей, принцип роботи таких систем полягає у відправленні радіосигналів та отриманні їх відбитків від об'єктів у повітрі. Оптичні системи [4], з іншого боку, покладаються на використання видимого та інфрачервоного випромінювання, що випромінюється повітряними цілями. Ці системи можуть надавати більш детальні зображення, але обмежені погодними умовами та оптичним спотворенням противника.

Серед інших підходів слід відзначити системи відеоспостереження [5]. Вони базуються на використанні відеокамер та спеціалізованих алгоритмів обробки зображень. Такі системи можуть виявляти рух об'єктів, серед яких можуть бути повітряні цілі, та відображати їх на моніторі в режимі реального часу.

Також застосовуються акустичні системи, вони здатні працювати в умовах обмеженої видимості та радіомовчання. Дослідження [6] показали, що акустичні сенсори забезпечують виявлення дронів-камікадзе на відстані близько 2,6 км та крилатих ракет – до 8,2 км, що підтверджують надійність та практичність таких систем.

Однією з ініціатив є система, відома як «Звук» [7], вона була розроблена військовослужбовцями 125-ї окремої бригади Сил територіальної оборони Збройних сил України. Вона призначена для виявлення акустичних сигналів, спричинених рухом повітряних об'єктів, таких як літаки та дрони.

Важливо зазначити, що інформація про деякі сучасні системи може бути обмеженою або засекреченою, але відомо, що існують певні акустичні системи виявлення [8], створені для цивільних і військових цілей.

Незважаючи на існуючі рішення, розробка програмного забезпечення з інтерактивною картою є інноваційним напрямком. Це дозволяє збирати дані з акустичних сенсорів і відображати їх на географічній карті, забезпечуючи зручний спосіб аналізу ситуації. Такий інтерактивний підхід дозволяє швидко реагувати на нову інформацію та визначені цілі, забезпечуючи більш швидке та ефективне прийняття рішень.

### 3. Постановка задачі

Це дослідження має на меті вирішити нагальну і складну проблему забезпечення безпеки та оборонної спроможності в умовах повномасштабної війни, що зараз ведеться в Україні. Зростаюча загроза з боку різноманітних повітряних об'єктів, таких як дрони, ракети та літаки, вимагає розробки інноваційних систем і технологій для виявлення, відстеження та аналізу подій у повітряному просторі.

Основним завданням цього дослідження є створення програмного забезпечення, яке зможе збирати та аналізувати дані, що надходять від акустичних сенсорів, призначених для виявлення повітряних цілей. Таке програмне забезпечення має бути надійним, продуктивним і здатним працювати в режимі реального часу. Це важливо для оперативного реагування на можливі загрози та своєчасного прийняття рішень.

Загальна мета цього дослідження — вдосконалення систем моніторингу та безпеки, особливо в умовах активних військових конфліктів та загроз з боку повітряних об'єктів. Наша робота спрямована на забезпечення національної безпеки та обороноздатності України в надзвичайних умовах.

### 4. Схема роботи системи

На початку процесу розробки архітектури цієї системи перед нашою командою стояло важливе завдання — розробити загальну концепцію, яка б відповідала потребам і вимогам проекту. Ця початкова фаза є критично важливою, оскільки від неї залежить подальше розгортання проекту та успіх його реалізації. Вибір правильного архітектурного підходу був критично важливим для забезпечення надійності, продуктивності та масштабованості системи.

Під час обговорення та аналізу було визначено кілька ключових вимог:

- **Реальний час:** система повинна надавати дані в режимі реального часу, оскільки це є необхідним для своєчасного виявлення та реагування на повітряні загрози.
- **Надійність:** збір і обробка даних повинні бути надійними, оскільки від цього залежить ефективність і точність системи.
- **Масштабованість:** система повинна бути здатна масштабуватися для обробки великих обсягів даних та підтримувати додавання нових сенсорів і ресурсів.
- **Безпека:** забезпечення захисту даних і системи від несанкціонованого доступу було пріоритетним завданням.
- **Простота використання та інтеграції:** розроблена система повинна бути простою у використанні та інтеграції з іншими системами.

Принцип роботи системи базується на архітектурі клієнт-сервер, де клієнтами є акустичні сенсори, а сервером — веб-сервер [9]. У процесі роботи сенсори надсилають запити з інформацією, що містить їхні власні географічні координати, ідентифікатор виявленої цілі, її азимут, кут розташування та час виявлення. Алгоритм роботи сервера подібний до алгоритму роботи сервера розподіленої системи звукової артилерійської розвідки [10]. Він забезпечує формування та підтримку черги запитів, їх агрегацію, обчислення географічних координат та нанесення цілей на карту.

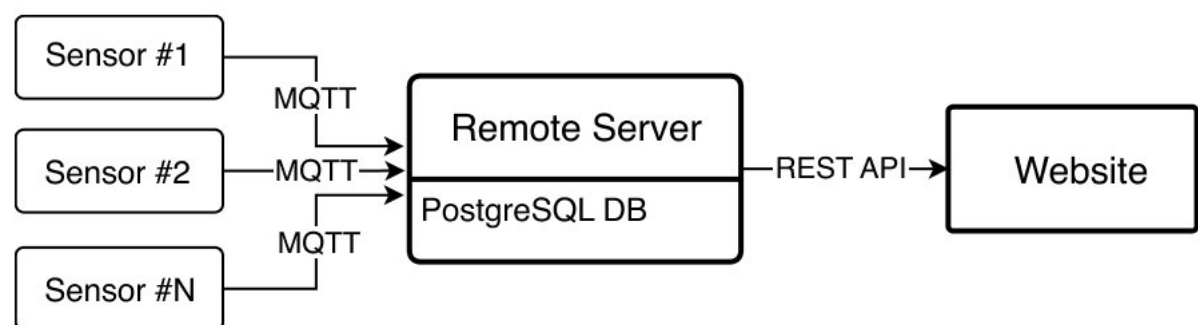


Рис.1. Схематичне зображення роботи системи

На рис. 1 показана схема, що відображає архітектуру системи дистанційного моніторингу, яка включає набір сенсорів і серверну підтримку. Кожен сенсор (позначений як «Сенсор № 1», «Сенсор № 2» до «Сенсор № N»),

де N — кількість сенсорів) передає дані через мережу 2G за допомогою протоколу MQTT [11] на віддалений сервер. MQTT забезпечує надійну доставку повідомлень навіть в умовах нестабільного з'єднання, він базується на моделі «публікація-підписка», яка дозволяє сенсорам публікувати дані, а серверу підписуватися на «теми». Це дозволяє ефективно організувати обмін даними між багатьма сенсорами та сервером. Це важливо для системи, яка отримує дані в режимі реального часу від сенсорів. На сервері дані записуються в базу даних PostgreSQL. Віддалений сервер, у свою чергу, взаємодіє з веб-сайтом через REST API [12], що дозволяє користувачам переглядати дані через інтерфейс веб-сайту.

## 5. Розробка клієнтської частини

Під час розробки клієнтської частини системи для відображення ситуації з повітрям та взаємодії з акустичними сенсорами на карті, вибір технологій для створення клієнтської частини був важливим етапом, який визначав якість та продуктивність нашого веб-додатку. Основними факторами були швидкість відображення інформації та рівень завантаження веб-сторінки.

Використання TypeScript [13] стало ключовим фактором у забезпеченні стабільності та надійності коду. Статична типізація допомогла виявити та уникнути помилок на ранніх етапах розробки, що зменшило ризик непорозумінь та підвищило продуктивність розробників.

Рішення використовувати бібліотеку React [14] разом з React DOM було обумовлено багатьма факторами, які мали вирішальний вплив на успіх розробки нашого проекту. React відомий своєю високою продуктивністю, яка дозволяє створювати інтерактивні інтерфейси та швидко і ефективно реагувати на зміни. Однією з ключових переваг React є його віртуальний DOM. Він дозволяє мінімізувати маніпуляції з реальним DOM, оскільки React виконує внутрішні оптимізації та ефективно оновлює тільки ті частини сторінки, які змінилися. Це призводить до значного збільшення швидкості відображення інформації та поліпшення користувацького досвіду. React має велику кількість сторонніх бібліотек і компонентів, які дозволяють розробникам швидко створювати складні функції інтерфейсу без необхідності писати код «з нуля». Це економить час і зусилля на розробку та допомагає зберегти код більш структурованим і читабельним.

Бібліотека Axios [15] для здійснення HTTP-запитів до сервера. Ця бібліотека надає зручний інтерфейс для здійснення запитів і обробки відповідей від сервера. Важливо було розробити оптимальну логіку обробки запитів і відповідей, щоб зменшити кількість запитів і обсяг передачі даних, що впливає на швидкість завантаження сторінки.

Ми вибрали бібліотеку Mapbox GL [16] для відображення географічних даних на карті з кількох причин, однією з яких була її здатність працювати з векторними картами, а не растровими. Цей вибір був обґрунтований наступними факторами:

- Векторні карти зазвичай мають набагато менший обсяг даних у порівнянні з растровими, що покращує продуктивність і швидкість завантаження сторінки. Це особливо важливо, коли ми маємо справу з великим обсягом географічних даних, які потрібно відображати в режимі реального часу.
- Використання векторних карт дозволяє створювати інтерактивні додатки, які можуть бути менш обтяжливими при роботі з великою кількістю об'єктів на карті. Це пов'язано з тим, що векторні дані мають менший обсяг і дозволяють ефективно керувати відображенням та взаємодією з об'єктами на карті. Такий підхід допомагає поліпшити користувацький досвід, особливо при роботі з великим обсягом даних.
- Векторні карти дозволяють точно налаштувати стиль і зовнішній вигляд карти, включаючи кольори, об'єкти, текст та інші атрибути. Це дає можливість створювати красиві та інформативні карти, що відповідають потребам проекту.

При створенні інтерактивної карти ми реалізували тестування відображення великої кількості об'єктів. Одним із рішень для оптимізації відображення карти було використання кластеризації. Кластеризація дозволяє групувати географічно близькі об'єкти в одній точці на карті, що значно спрощує візуальне сприйняття і покращує продуктивність у випадку великої кількості об'єктів на карті. Такий підхід дозволяє користувачам легко аналізувати і взаємодіяти з великою кількістю об'єктів на карті, забезпечуючи зручний і швидкий доступ до інформації.

Важливо зазначити, що вибір технологій вимагав ретельного аналізу та розумного підходу, оскільки від них залежала продуктивність та ефективність системи. Правильно підібрані технології сприяли швидкому та надійному відображенню інформації та оптимізації завантаження веб-сторінок, що робить нашу систему чудовим інструментом для моніторингу повітряних умов та акустичних сенсорів.

## 6. Розробка серверної частини

Під час розробки серверної частини нашої системи ми приділили особливу увагу вибору технологій та інструментів, які допомогли забезпечити надійність, продуктивність та розширюваність додатка.

Мова програмування Go (або Golang [17]) стала основним інструментом для розробки нашої серверної частини з кількох важливих причин. По-перше, вона відома своєю високою продуктивністю та швидкістю виконання коду. Це було критично важливо для системи реального часу, де швидкість обробки даних є ключовою.

Для забезпечення надійності та масштабованості нашої системи ми використовували Docker [18]. Цей інструмент дозволив нам упакувати додаток та всі його залежності в контейнери, що спростило розгортання та масштабування нашої системи. Docker спротив переміщення та запуску додатка в різних середовищах.

База даних PostgreSQL [19]. Ця реляційна база даних відома своєю надійністю, масштабованістю та здатністю обробляти складні запити. Вона дозволила нам ефективно зберігати дані сенсорів, інформацію про погоду та забезпечувати безпеку та авторизацію користувачів. Переваги її використання:

- Надійність: PostgreSQL відома своєю надійністю та стабільністю. Вона має механізми відновлення даних, що дозволяють уникнути втрати інформації в разі аварій або збоїв.
- Розширюваність: PostgreSQL легко розширюється та масштабується. Це дозволяє додавати нові таблиці, індекси та інші об'єкти для забезпечення зростання обсягу даних та навантаження на базу даних.
- Підтримка складних запитів: PostgreSQL має потужні можливості для виконання складних SQL-запитів. Це дозволяє ефективно відбирати, фільтрувати та агрегувати дані для отримання необхідної інформації.
- Гнучкість: PostgreSQL підтримує різноманітні типи даних, включаючи географічні та текстові дані. Це робить її ідеальним вибором для проєктів, що вимагають зберігання та обробки різних типів інформації.
- Безпека та авторизація: PostgreSQL має потужні засоби для забезпечення безпеки даних та авторизації користувачів. Ви можете легко налаштувати права доступу до даних та забезпечити конфіденційність і цілісність даних.

Серверна частина нашого додатка включає в себе різноманітну функціональність, яка була реалізована з урахуванням вимог до продуктивності та надійності. Ми реалізували систему авторизації з різними типами ролей для користувачів, щоб забезпечити безпеку та контроль доступу. Вхід в систему допомагає відстежувати події та тестувати додаток. Взаємодія з акустичними сенсорами та обробка їх даних в режимі реального часу була реалізована для точного відображення ситуації з повітрям. Інтеграція інформації про погоду та можливість збирати статистичні дані і проводити аналітику підвищили корисність додатка.

Всі ці рішення були обрані з урахуванням важливості продуктивності, надійності та зручності використання, і вони дозволили нам створити надійний та ефективний сервер для нашої системи.

## 7. Тестування програмного забезпечення

Під час розробки та вдосконалення нашої системи ми приділяли велику увагу тестуванню програмного забезпечення. Мета тестування полягала в тому, щоб забезпечити надійність та ефективність системи перед її введенням в експлуатацію.

Спочатку ми провели тестування функціональності, перевіряючи, чи правильно виконуються всі основні операції системи. Це включало перевірку правильності збору даних з сенсорів, обробки цих даних та відображення їх на карті. Ми також протестували можливості авторизації та ролі користувачів.

Система була піддана навантажувальному тестуванню, щоб переконатися, що вона може стабільно та ефективно працювати з великими обсягами даних і користувачів. Ми створили сценарії з великою кількістю запитів і одночасних підключень, щоб оцінити продуктивність системи.

Забезпечення безпеки було одним з найважливіших аспектів тестування. Ми провели тестування на проникнення, щоб виявити потенційні вразливості та ризики безпеки. Ми також протестували систему на відповідність стандартам безпеки та впровадили механізми захисту даних.

## 8. Результати дослідження

З метою забезпечення зручності та інтуїтивності використання ми ретельно розробили користувацький інтерфейс нашої системи. Давайте розглянемо кілька ключових аспектів інтерфейсу та його можливостей.

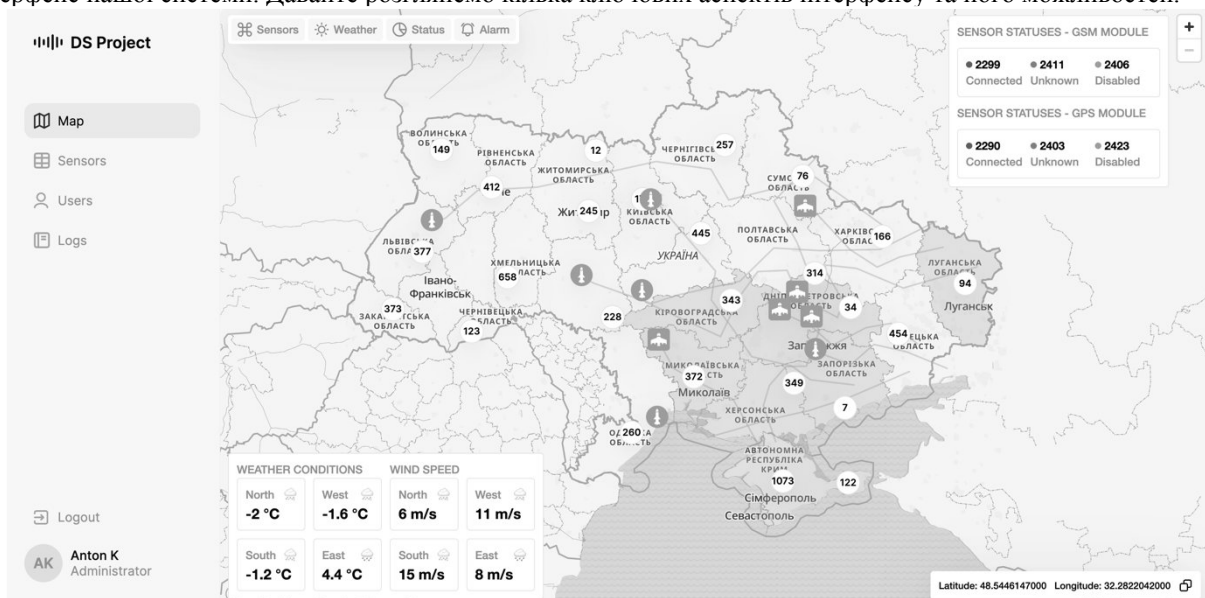


Рис.2. Інтерактивний інтерфейс карти

На рис. 2 показано головну сторінку зліва від навігації, а праворуч — інтерактивну карту, яка відображає дані про ситуацію в повітрі. Також є різні інформаційні панелі та панелі керування. Зокрема, на карті ми бачимо

приклад руху повітряних цілей, поточний стан загрози за регіонами, а групи сенсорів у кластерах позначені цифрою — кількістю сенсорів у кожному кластері. Система надає користувачам можливість відстежувати рух дронів, ракет та інших об'єктів у повітрі. Великий масштаб зображення дозволяє швидко реагувати на будь-які події.

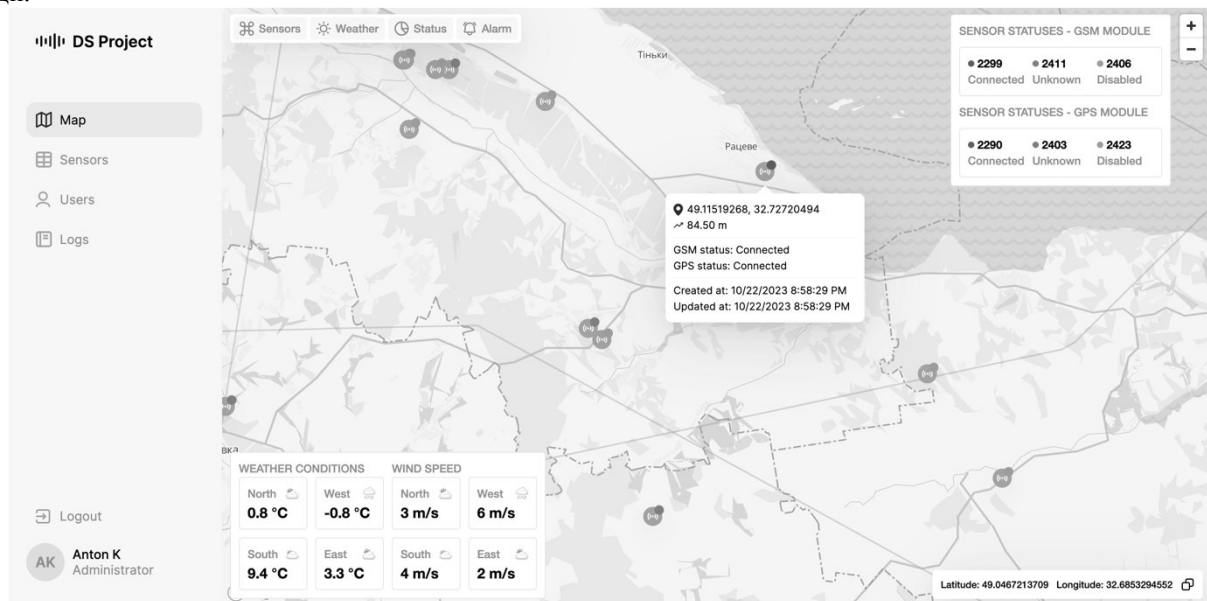


Рис.3. Інтерактивний інтерфейс карти з збільшеним масштабом

На рис. 3 показано інтерактивну карту з збільшеним масштабом, на якій видно, що на даному етапі кластерів немає, а сенсори розташовані окремо. Це дозволяє користувачам переглядати та отримувати інформацію про кожен з них окремо, забезпечуючи більш детальний огляд об'єктів та їх характеристик. Цей режим відображення дозволяє користувачам отримувати точну та конкретну інформацію про кожен сенсор, що може бути корисним для аналізу та прийняття рішень.

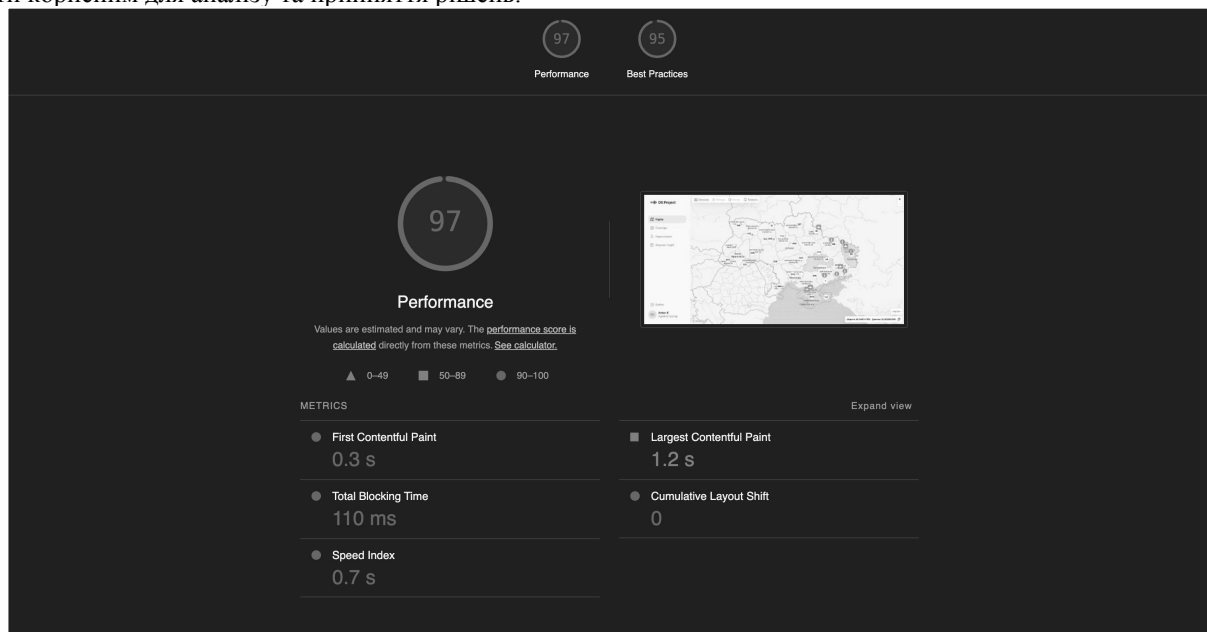


Рис.4. Аналітика швидкості веб-додатку

Під час тестування нашого програмного забезпечення за допомогою інструменту Lighthouse [20] були отримані наступні результати, показані на рис. 4, що свідчать про високу продуктивність та ефективність системи:

- Перше зображення вмісту відображається у вікні браузера всього за 0,3 секунди після завантаження сторінки. Це означає, що користувачі отримують швидкий доступ до ключового вмісту.
- Найбільше зображення контенту завантажується на сторінку всього за 1,2 секунди, що підвищує комфорт користувачів та зручність взаємодії з системою.
- Загальний час блокування становить 110 мілісекунд, що свідчить про низьку кількість операцій блокування під час взаємодії користувача з інтерфейсом.
- Кумулятивне зміщення макета становить 0, що означає відсутність несподіваних змін у макеті сторінки під час її завантаження.

- Індекс швидкості встановлений на рівні 0,7 секунди, що свідчить про швидкість і ефективність завантаження сторінки.

Отримані результати підтверджують, що наше програмне забезпечення працює з високою продуктивністю і надає користувачам швидкий і зручний інтерфейс для моніторингу повітряних умов і акустичних сенсорів.

## 9. Висновки

У контексті сьогоденної повномасштабної війни в Україні ефективне використання та відображення даних акустичних сенсорів, призначених для виявлення повітряних цілей, є надзвичайно важливим для забезпечення національної безпеки та оборонної спроможності. Розроблене програмне забезпечення створює необхідну інфраструктуру для ефективного моніторингу та аналізу повітряної обстановки та руху об'єктів у повітрі.

Інтерактивна карта, що надається цією системою, дозволяє швидко отримувати дані в режимі реального часу та відображати їх на географічній карті. Це дає можливість відстежувати та визначати рух дронів, ракет та інших повітряних цілей. Користувачі можуть взаємодіяти з картою, аналізувати дані та приймати необхідні рішення в режимі реального часу.

Система має значний потенціал для подальшого вдосконалення. Основна увага приділяється оптимізації продуктивності серверної частини для зменшення споживання ресурсів та збільшення швидкості реакції на дані сенсорів. Паралельно планується розширення функціональних можливостей, зокрема додавання інтерактивних інструментів для користувачів.

Результати роботи цієї системи можуть значно підвищити рівень безпеки та контролю в умовах конфлікту та війни, сприяючи забезпеченню ефективного моніторингу та захисту важливих об'єктів і територій. Наша робота спрямована на забезпечення національної безпеки та обороноздатності України.

## Подяка

Ця робота підтримана Національним фондом досліджень України, номер проєкту 2023.04/0116 «Модульна акустична система моніторингу повітряного простору» у межах конкурсу «Наука для зміцнення обороноздатності України».

## Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що не існує жодних фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи.

## Список літератури

- [1] <https://focus.ua/uk/voennyie-novosti/533239-rossiyane-atakuyut-goroda-dronami-geran-2-cto-eto-takoe-i-kak-sbit-bespilotnik-foto> – Electronic resource.
- [2] The Economist: The commander-in-chief of Ukraine's armed forces on how to win the war. URL: <https://www.economist.com/by-invitation/2023/11/01/the-commander-in-chief-of-ukraines-armed-forces-on-how-to-win-the-war>
- [3] Skolnik M. I. Radar Handbook. – 3rd ed. – McGraw-Hill, 2008.
- [4] Топчий Н.В. Аналітичний огляд сучасних оптичних систем: переваги та недоліки // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021. – Т. 32(3). – С. 142–148.
- [5] Elharrouss O., Subramanian N., Al-Maadeed S. A review of video surveillance systems // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11(5). – Article 2447.
- [6] Р. В. Кочан, Н. Є. Гоц, Л. Д. Озірковський та ін. Оцінка дальності акустичних датчиків. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львів, 15 – 16 травня 2024 р.). Львів: НАСВ, 2024. С. 210–211.
- [7] <https://zahid.espreso.tv/voini-125-i-brigadi-sil-tro-viyavlyayut-povitryani-tsili-za-dopomogoyu-zvuku> - Electronic resource.
- [8] R. Kochan, N. Hots, S. Fabirovskyy, V. Storozh, A. Kosterov, L. Ozirkovskyy, A. Helesh, S. Arkadii, V. Kochan, B. Strykhalyuk, M. Mykyichuk, I. Demydov "Approach to Acoustic Drone Detection System Development." - The 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) 2023 p. 471.
- [9] V. Hrusha et al., "Distributed Web-based Measurement System," 2005 IEEE Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Sofia, Bulgaria, 2005, pp. 355-358, doi: 10.1109/IDAACS.2005.283002.
- [10] R. Kochan et al., "Theoretical Error of Bearing Method in Artillery Sound Ranging," 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Metz, France, 2019, pp. 615-619, doi: 10.1109/IDAACS.2019.8924450.
- [11] A. Banks, E. Briggs, K. Borgendale, R. Gupta, MQTT version 5.0. OASIS Standard 2019b; URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
- [12] N. Yellavula, Building RESTful Web Services with Go, 2017
- [13] TypeScript documentation. URL: <https://www.typescriptlang.org/>
- [14] React.js documentation. URL: <https://reactjs.org/>
- [15] Axios documentation. URL: <https://axios-http.com/docs/intro>
- [16] Mapbox documentation. URL: <https://docs.mapbox.com/>
- [17] GoLang documentation. URL: <https://go.dev/doc/>
- [18] Docker documentation. URL: <https://docs.docker.com/>
- [19] PostgreSQL documentation. URL: <https://www.postgresql.org/docs/>
- [20] Lighthouse documentation. URL: <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/overview/>.

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6291-5591>

Сечко Олексій Ігорович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8870-7367>Кочан Роман Володимирович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1254-1982>

Дата отримання статті-10.10.25.

Дата отримання фінального варіанту – 28.10.25.

Дата публікації- 30.12.25.