



№ 5 (1), 2025

РОЗРОБКА МОБІЛЬНОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІТИКИ РАДІАЦІЇ В УКРАЇНІ

В. Пастух [ORCID: 0009-0005-4301-8993], М. Бешлей [ORCID: 0000-0002-7122-2319], Г. Бешлей [ORCID: 0000-0001-5392-3499],

Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Відповідальний за рукопис: М. Бешлей (e-mail: mykola.i.beshlei@lpnu.ua)

(Подано 1 квітня 2025)

У статті представлено результати дослідження, спрямованого на розробку мобільної кіберфізичної системи для моніторингу та аналітики радіаційного фону з урахуванням сучасних викликів у сфері екологічної безпеки. Актуальність теми зумовлена потребою у швидкому реагуванні на радіаційні інциденти, недостатнім покриттям існуючих стаціонарних систем моніторингу, а також необхідністю залучення громадськості до процесів екологічного контролю. Запропоновано інтелектуальну систему, побудовану на моделі архітектури «Колектор – Смартфон – Сервер», яка забезпечує збір, передачу, обробку та візуалізацію даних у режимі реального часу з використанням сучасних засобів безпроводного зв'язку та технологій обчислювального аналізу. Основними компонентами системи є сенсорний пристрій на базі мікроконтролера ESP32 із сенсором радіаційного фону GGreg20_V3, мобільний додаток для Android, що виконує функції зв'язку з пристроєм і сервером, а також серверна частина, яка обробляє інформацію та виконує аналітику з використанням нейронних мереж. Для оцінки ефективності запропонованої мобільної кіберфізичної системи, розроблено два окремі імітаційні середовища, кожне з яких дозволяє досліджувати поведінку системи в умовах, наближених до реального функціонування. Основна ідея моделювання полягає у порівнянні результативності фіксації джерел радіоактивного забруднення сенсорами рухомого типу у протиставленні до традиційних статичних рішень. У результаті моделювання встановлено, що рухомі сенсори виявляють у 7–45 разів більше випадків радіоактивного забруднення порівняно зі статичними за однакових умов, що свідчить про перевагу мобільного підходу у виявленні як локальних джерел, так і динамічних зон радіоактивного поширення. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження розробленої системи як ефективного рішення для оперативного радіаційного моніторингу. Запропонована система є масштабованою, доступною для широкого кола користувачів і може бути інтегрована у національну інфраструктуру моніторингу навколишнього середовища з можливістю залучення волонтерів і громадян до процесів забезпечення радіаційної безпеки.

Ключові слова: мобільна кіберфізична система, моніторинг радіації, екологічна безпека, безпроводний зв'язок, радіаційний сенсор, мікроконтролер ESP32, мобільний додаток для Android.

УДК: 621.396

Вступ

Моніторинг радіаційного фону є критично важливим для забезпечення безпеки населення та навколишнього середовища, особливо в країнах, які мають значний ядерний потенціал або були піддані радіаційним аваріям [1-3]. Традиційні системи моніторингу, засновані на стаціонарних сенсорах, мають обмежену здатність покривати великі території та оперативно реагувати на радіаційні інциденти [4]. Відсутність мобільності та гнучкості таких систем знижує їхню

ефективність та актуальність даних [5]. Наша робота спрямована на вирішення цих проблем шляхом розробки інтелектуальної мобільної кіберфізичної системи моніторингу та аналітики радіації. Основна ідея полягає у використанні рухомих сенсорів, які можуть бути розподілені між волонтерами та громадянами. Такий підхід дозволяє збирати дані з ширшої території, включаючи важкодоступні або зовсім не враховані в існуючих системах моніторингу місця. Залучення громадян та волонтерів до процесу моніторингу не лише розширює географічне покриття системи, але й підвищує обізнаність населення щодо радіаційної безпеки.

Використання смартфонів як засобу збору та передачі даних робить процес зручним і доступним для широкої аудиторії. Смартфони можуть слугувати інтерфейсом для відображення інформації про рівень радіації, а також засобом для надсилання зібраних даних на центральний сервер із використанням мереж доступу 2G–4G та Wi-Fi.

Одним із ключових елементів запропонованої системи є створення детальної інтерактивної карти, що постійно оновлюється та забезпечує актуальну інформацію про радіаційний фон у різних регіонах. Інтелектуальна аналітична платформа на основі нейронних мереж, також дасть змогу у майбутньому прогнозувати потенційні радіаційні відхилення та аномалії у реальному часі, підвищуючи ефективність відповіді на можливі радіаційні інциденти та сприяючи більш швидкому усуненню їхніх наслідків.

Система може бути інтегрована з іншими інтелектуальними екологічними платформами, що займаються моніторингом повітря, води та ґрунтів. У свою чергу це дозволить створити єдину екосистему для аналізу та прогнозування екологічних загроз на основі комплексних даних, що сприятиме більш точному та своєчасному прийняттю рішень.

2. Проектування архітектури кіберфізичної системи збору та обробки радіаційних даних

У роботі проведено детальний аналіз вимог, підходів та ключових компонентів з метою визначення оптимального рішення для збору, зберігання та обробки даних радіаційного фону. Розгляд різних методів та архітектур дозволяє виявити сильні та слабкі сторони кожного підходу й обґрунтовано обрати найдоцільніше рішення відповідно до вимог системи. Способи проектування кіберфізичних систем збору та обробки даних залежать від вимог до системи, серед яких варіанти експлуатації, мобільність, розширюваність, автономність. Як було зазначено раніше, ключовими вимогами до системи збору даних радіаційного фону є наступні:

- Мобільність – система повинна бути зручною та простою в експлуатації, в тому числі і в місцях підвищеної радіаційної небезпеки, охоплювати максимально велику територію.
- Ефективність – збір та обробка даних повинна бути розподілена в системі для швидкої роботи.
- Розширюваність – система повинна бути легкою до введення додаткових компонентів та функціоналу.
- Надійність – система повинна безвідмовно працювати, в тому числі в середовищі радіоактивних шумів, що здатні пошкодити техніку.

Беручи до уваги дані вимоги, можна виділити декілька варіантів проектування мережевої архітектури системи для збору і обробки даних радіаційного фону:

1) Модель “Колектор – Хаб”

Даний спосіб проектування архітектури базується на використанні пристроїв для збору даних з середовища “Колекторів” та пристроїв для збору та обробки даних “Хабів” (Рис.1). Основна функція “Колектора” отримати фізичний показник, перетворити його в цифрове значення та передати його на обробку до пристрою “Хаб”. Особливістю такої системи є простота реалізації та експлуатації. Виділена кількість “Хабів” встановлюється на певній території та налаштовується на отримання даних з “Колекторів”. З’єднання між пристроями може бути встановлено провідними так і безпроводними інтерфейсами. Серед переваг даного підходу є простота реалізації. Недоліками

є низька ефективність, складність розширення системи та перспективи виведення з ладу пристроїв через їх статичне встановлення.

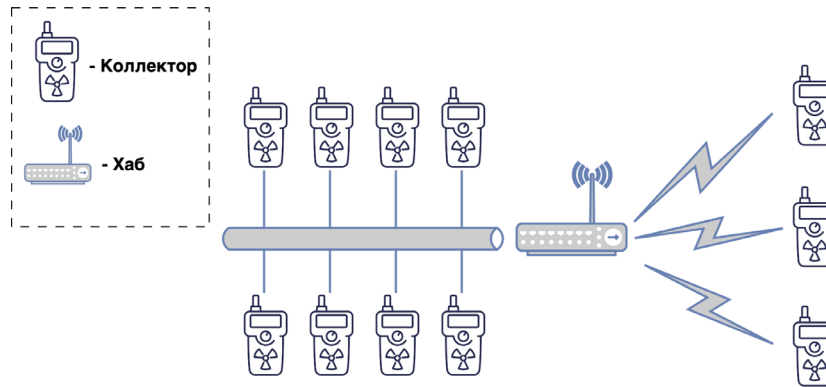


Рис. 1. Модель мережевої архітектури "Коллектор – Хаб"

2) Модель "Коллектор – Хаб – Сервер"

Дана модель проєктування мережі системи є покращеним варіантом попередньої, особливістю якої є використання третьої компоненти для централізованого збору та обробки даних (Рис.2). Пристрій "Сервер" встановлює комунікацію з пристроями "Хаб", може бути як локальним, та обслуговуватись в межах визначеної території, або бути хмарним веб-сервером доступним через мережу інтернет, що дає змогу охопити більшу територію. Перевагою даної моделі є зручність експлуатації та висока ефективність, через делегування основної частини обробки на потужний централізований сервер, проте недоліками є мобільність та розширюваність, що обумовлена статичними композиціонуванням пристроїв "Коллекторів" та "Хабів".

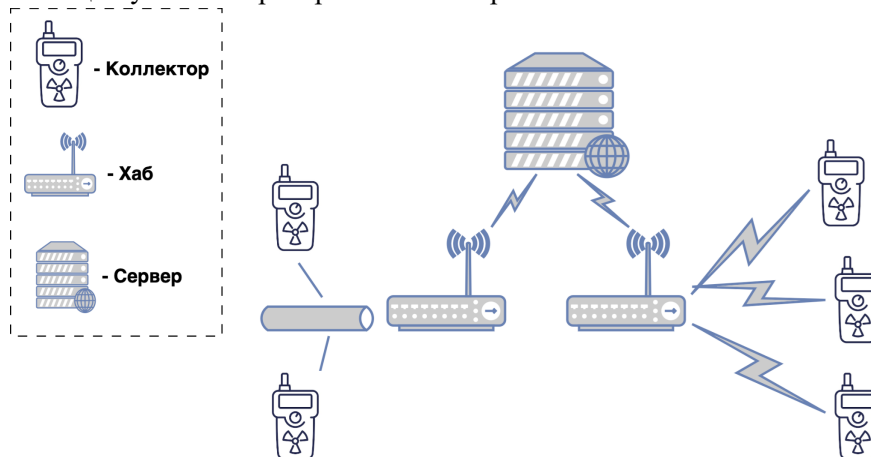


Рис. 2. Модель мережевої архітектури "Коллектор – Хаб – Сервер"

3) Модель "Коллектор – Смартфон – Сервер"

Ця модель передбачає зміну логіки роботи вузла збору даних середовища до проміжного компонента передачі даних на сервер. На відміну від попередніх моделей де присутній статично встановлений пристрій, що отримує дані з "Коллекторів", у даному випадку цю роль бере на себе мобільний пристрій "Смартфон" (Рис.3). Особливість даного підходу є мобільність пристрою "Смартфона", що дозволяє охопити максимальну територію вимірювання, а також забезпечити довготривалість його роботи у складних умовах. Ключовим моментом є те що "Смартфон", як мобільний високопродуктивний комп'ютер, окрім передачі даних з сенсорів на централізований сервер, може також взаємодіяти з сервером у двосторонньому порядку, та виконувати додаткову обробку інформації на своєму рівні. Взаємодія пристроїв відбувається по безпроводній мережі Wi-Fi/Bluetooth, між пристроями "Коллектор" та "Смартфон", та 3G/4G/Wi-Fi між пристроями "Смартфон" та "Сервер".

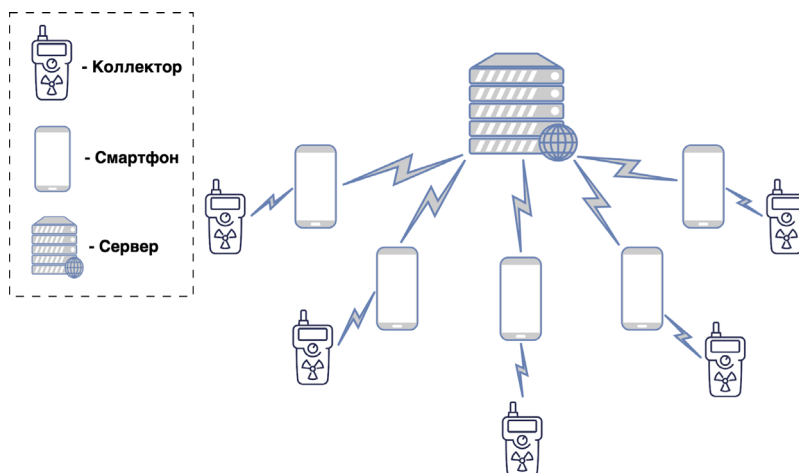


Рис. 3. Модель мережевої архітектури "Коллектор – Смартфон – Сервер"

Базуючись на вимогах до системи збору та обробки даних радіаційного фону, оптимальним рішенням мережевої структури системи вибрано модель "Коллектор – Смартфон – Сервер", через високий рівень мобільності у експлуатації та легкої масштабованості.

3. Опис архітектури та основних компонентів мобільної кіберфізичної системи моніторингу радіаційного фону

На основі проведеного аналізу спроектовано архітектуру системи, а також визначено детальний склад і принцип роботи її компонентів. Основними елементами збору, передачі та обробки даних виступають пристрій із сенсором радіаційного фону, смартфон і сервер, кожен з яких виконує визначені функції для забезпечення надійного та ефективного моніторингу. Пристрій працює на основі мікроконтролера ESP32, оскільки даний мікроконтролер має вбудовані інтерфейси безпроводної комунікації Wi-Fi та Bluetooth, тому додатковими комплектуючими є живлення та сенсор вимірювання радіаційного фону "GGreg20_V3", у основі якого лежить детектор радіоактивних частинок СБМ-20 (Рис.4).

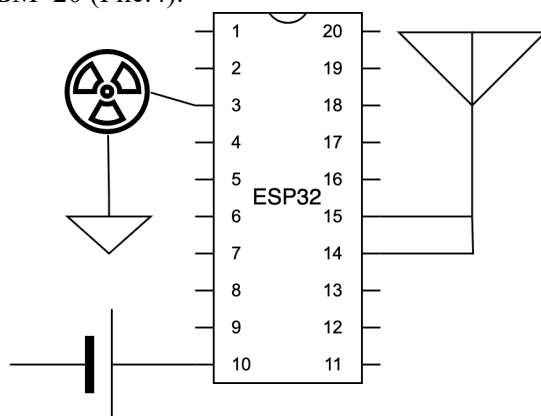


Рис. 4. Схема пристрою вимірювання радіаційного фону

Сенсор вимірювання радіаційного фону приєднаний до цифрового піну мікроконтролера передає сигнал, на кожен імпульс зафіксований на ньому. Визначення рівня радіаційного фону вираховується кількістю імпульсів за одиницю часу, після чого вираховується за формулою:

$$D = \frac{N}{60} \cdot k, \quad (1)$$

де D доза іонізуючого випромінювання (мкЗв/год), N – кількість імпульсів за 1 хвилину, k – коефіцієнт перетворення (з пристрою 0.0092)

Отримане значення передається на наступний компонент системи, а саме до смартфона для внесення значення у базу даних для подальшої обробки і зберігання.

Для взаємодії з пристроєм на ньому налаштовується кастомне програмне забезпечення, яке забезпечує отримання даних через безпроводну мережу, проміжну обробку інформації та передачу її на сервер. Окрім цього, дана компонента системи також реалізує функції отримання та візуалізації зведених даних із сервера з метою відображення рівня радіаційного фону з інших пристроїв, які не є безпосередньо підключеними до нього. Загальну архітектуру мобільного додатка можна подати у вигляді діаграми компонентів наступним чином (рис.5).

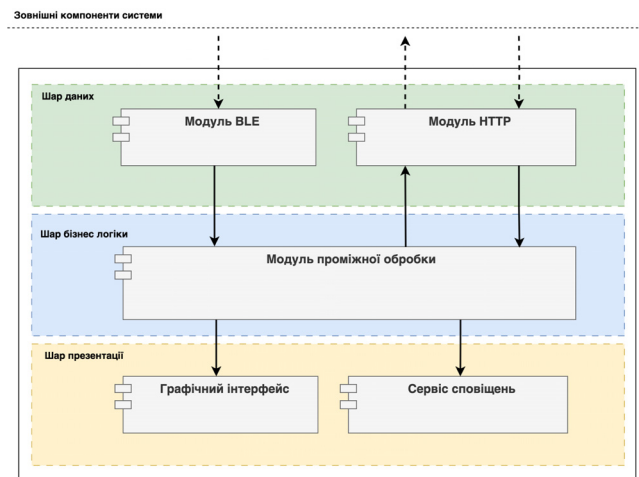


Рис. 5. Діаграма компонентів мобільного додатку системи

На даній діаграмі компонентів відображена взаємодія різних модулів програмного забезпечення на мобільному пристрої на різних шарах:

1) Шар даних – містить два модулі, що взаємодіють з іншими компонентами системи: пристроями вимірювання та сервером. Модулі не пов'язані один з одним, а взаємодіють через модуль проміжної обробки даних, для збереження їх незалежності та легкої заміни у разі змін у системі.

- модуль BLE – відповідає за встановлення зв'язку та отримання даних з пристрою вимірювання радіаційного фону по протоколу bluetooth low energy. У даному модулі налаштовано підписку на безперервне прослуховування відповідної bluetooth характеристики, на яку надходять дані радіаційного фону;
- модуль HTTP – відповідає на взаємодію з віддаленим сервером по протоколу http. Включає налаштований інтерфейс взаємодії по відповідним запитам як для надсилання даних з пристрою вимірювання радіаційного фону, так і отримання загальних даних з інших пристроїв, даних аналітики та сповіщень.

2) Шар бізнес логіки – представлений у вигляді модуля, що містить набір алгоритмів обробки даних, логічно розподілених в окремих класах.

- модуль проміжної обробки – відповідає за попередню обробку даних радіаційного фону отриманих з пристрою, що передаються на сервер та користувачу.

3) Шар презентації – включає в себе набір варіантів взаємодії користувача з системою, реалізованих у відповідних модулях:

- графічний інтерфейс – відповідає візуальну взаємодію користувача з системою та графічне відображення даних. Містить набір екранів для різних функцій системи, таких як: відображення даних радіаційного фону на мапі, даних з пристрою у реальному часі, приєднання пристрою вимірювання;
- сервіс сповіщень – додатковий модуль взаємодії з користувачем через системні сповіщення для повідомлення про критичні значення радіаційного фону зафіксовані у системі,

Обробляються у неактивному стані мобільного додатку та супроводжуються звуковим сигналом для користувача.

Сервер у системі є віддаленим центром обробки і зберігання даних з усіх пристроїв вимірювання даних радіаційного фону. У поточному варіанті системи він його можна відобразити у такому вигляді (Рис.6):

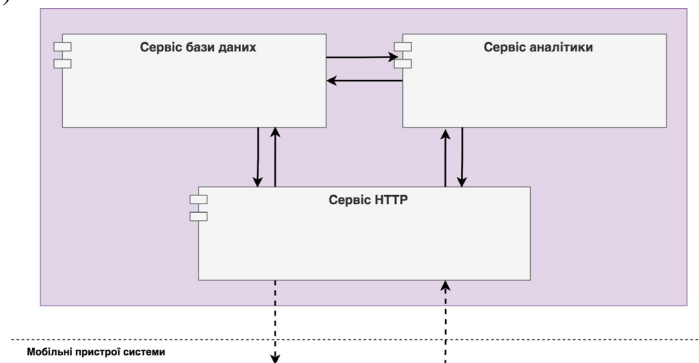


Рис.6. Діаграма компонентів серверної компоненти системи

На даній діаграмі відображено набір сервісів, зв'язки між ними та зовнішніми компонентами. Сервіси взаємопов'язані, що дозволяє поширювати дані між ними напрямку, для забезпечення швидкої та надійної обробки, а також захисту даних в межах сервера. Взаємодія з іншими компонентами обмежена, та реалізована в окремому сервісі.

1. Сервіс бази даних – реалізований у вигляді NoSQL бази даних. Відповідає за збереження даних у структурах для даних про користувачів, активні пристрої та дані що вони надсилають.

2. Сервіс аналітики – даний сервіс представлений у вигляді додаткового модуля обробки даних, що виконує окремі функції комбінації та перетворення даних радіаційного фону з усіх пристроїв. Крім того, модуль забезпечує можливість використання нейронних мереж для прогнозування поширення рівня радіації.

3. Сервіс HTTP – реалізований у наборі HTTP запитів у функціях читання, редагування та видалення даних. Надає обмежений доступ іншим компонентами системи до даних що обробляються в межах даного сервера.

4. Імітаційне моделювання процесів збору та обробки радіаційних даних у мобільній кіберфізичній системі

Для перевірки функціональності системи створено дві імітаційні моделі, які дозволяють порівняти ефективність виявлення радіоактивних джерел за допомогою сенсорів рухомого та статичного типу.

Модель 1

Робота імітаційної моделі полягає обрахунку сенсорами кількості зафіксованих випадкових локальних точок радіоактивного забруднення на основі вхідних параметрів моделі. При кожній появі точки радіоактивного забруднення, модель оглядає сенсори поряд з нею та обраховує кількість зафіксованих точок під час всього процесу.

Вхідні параметри:

- площа полігону;
- кількість радіоактивних точок;
- кількість сенсорів сенсорів;
- радіус фіксації сенсора.

Вихідні дані:

- кількість зафіксованих точок статичними сенсорами;
- кількість зафіксованих точок рухомими сенсорами.

Алгоритм роботи моделі представлено у вигляді блок-схеми (рис.7)

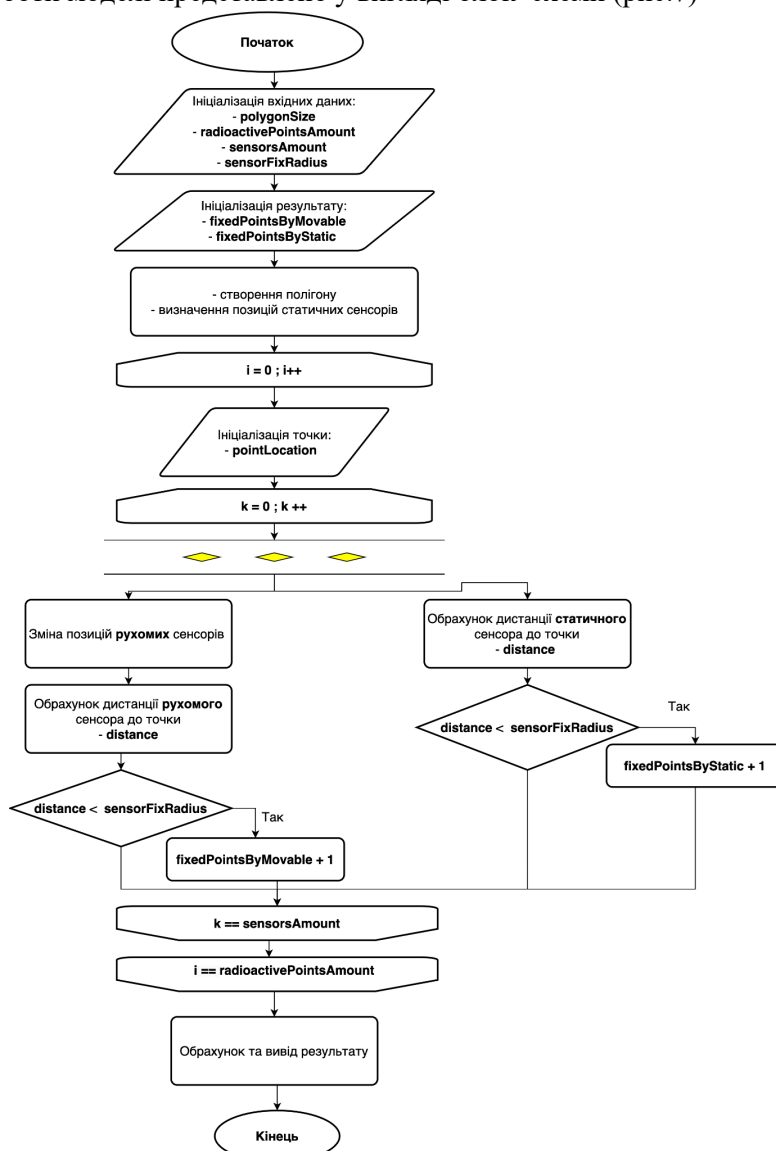


Рис.7. Блок-схема алгоритму роботи імітаційної моделі фіксації точок радіоактивного забруднення

Проведено експеримент за допомогою моделі з наступним набором вхідних параметрів (табл.1):

Таблиця 1

Вхідні дані моделювання

Параметр	Значення
Площа полігону	1000 м.кв
Кількість радіоактивних точок	100
Кількість сенсорів	10
Радіус фіксації сенсора	50 м

Результат під час однієї ітерації у вигляді зафіксованих точок радіоактивного забруднення сенсорами статичного та рухомого типу показав різницю значень у 10 разів, де статичними було зафіксовано 8 точок, в той час як рухомими 89 (рис.8).

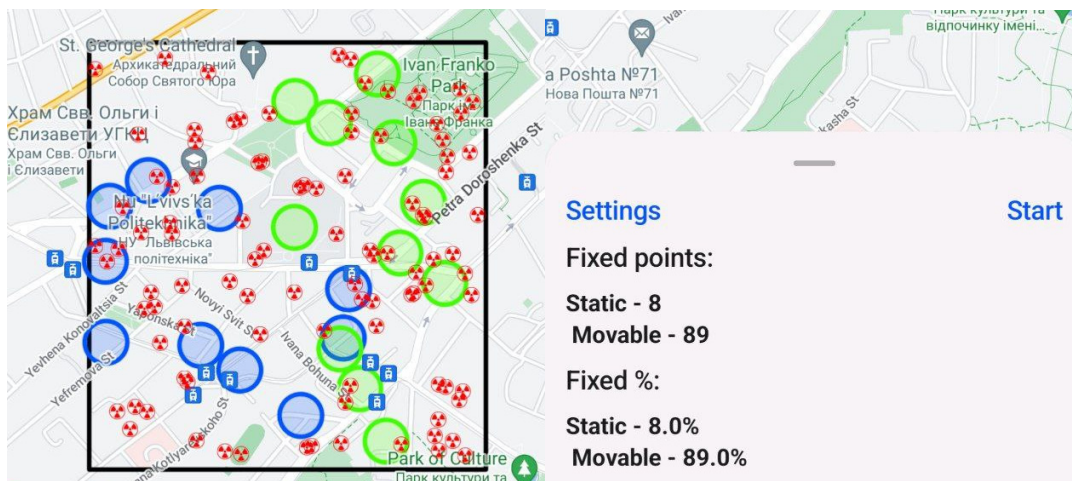


Рис.8. Результат роботи імітаційної моделі фіксації точок радіоактивного забруднення

Для детальнішого порівняльного аналізу проведено аналогічних 100 ітерацій роботи імітаційної моделі, зібрано масив даних зафіксованих точок та обраховано точнішу різницю роботи різних типів сенсорів. Обраховані середні, максимальні та мінімальні значення наведено у табл.2.

Таблиця 2

Отримані результати моделювання

	Статичні	Рухомі
count	100.000000	100.000000
mean	0.810000	36.740000
std	0.872648	4.377675
min	0.000000	24.000000
max	3.000000	45.000000

Результати обрахованих зафіксованих точок відповідно по кожній ітерації наведено на графіку (рис.9)

З результатів видно, що сенсори статичного типу мали мінімальні значення зафіксованих точок у кількості 0, в той час як рухомі 24. Середнє значення зафіксованих точок рухомих сенсорів більша у ~ 45 разів за середнє значення статичних (рис.10).

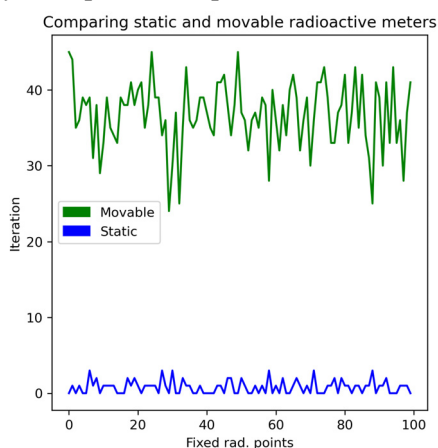


Рис.9. Зафіксовані точки радіоактивного забруднення сенсорами

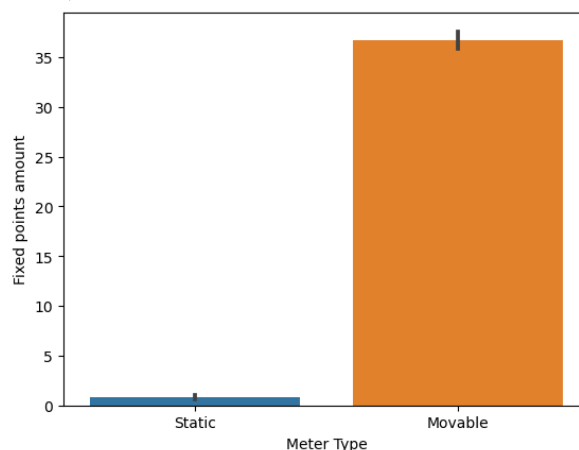


Рис.10. Середні значення зафіксованих точок сенсорами

Модель 2

Робота імітаційної моделі полягає фіксації сенсорами забрудненої зони великого масштабу, яка динамічно розширюється, наприклад аварії на атомній електростанції чи вибуху брудної бомби.

Відповідно до розширення та руху забрудненої зони, модель перевіряє та обраховує наявність рухомих та статичних сенсорів у її межах.

Вхідні параметри:

- площа полігону;
- напрям вітру (руху та розширення зони);
- кількість сенсорів;
- час імітації.

Вихідні дані:

- кількість зафіксованих зони статичних сенсорів;
- кількість зафіксованих у зоні рухомих сенсорів.

Алгоритм роботи моделі можна представити у вигляді блок-схеми (рис.11)

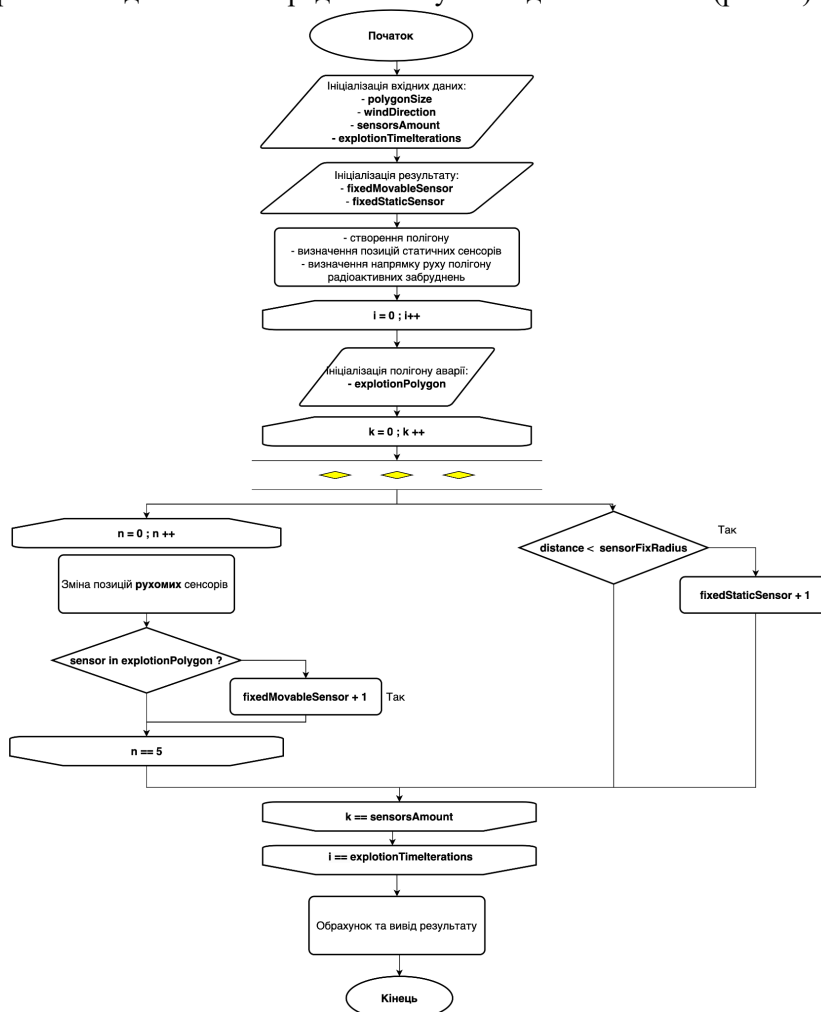


Рис.11. Блок-схема алгоритму роботи імітаційної моделі фіксації зони радіоактивного забруднення

Проведено експеримент з наступним набором вхідних параметрів (див.таб.3):

Таблиця 3

Вхідні дані моделювання

Параметр	Значення
Площа полігону	1000 м.кв
Напрямок вітру (руху та розширення зони)	Північно-західний
Кількість сенсорів	10
Час імітації	4 години

Результат у вигляді зафіксованої зони радіоактивного забруднення сенсорами статичного та рухомого типу показав різницю значень у 4 рази, на користь сенсорів рухомого типу (рис.12).

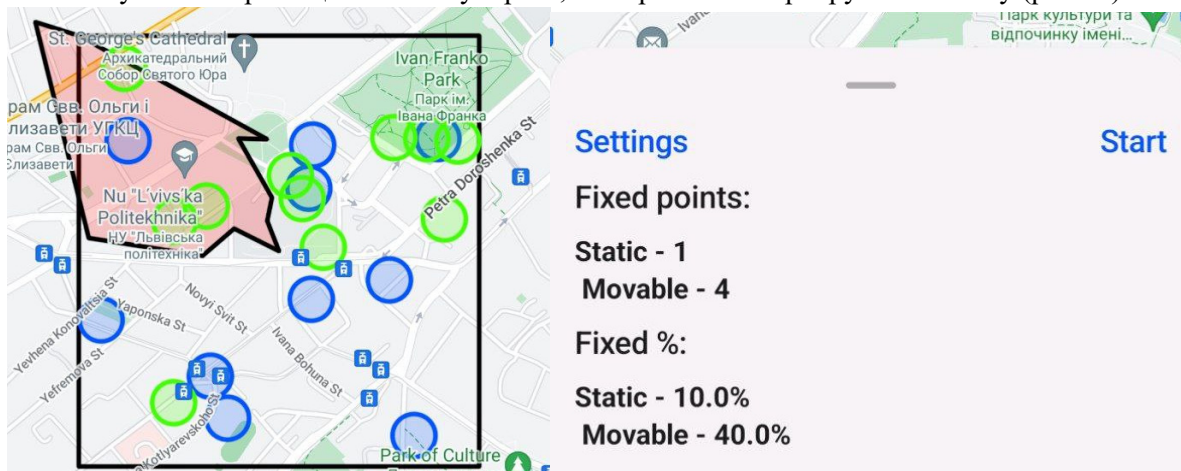


Рис.12. Результат роботи імітаційної моделі фіксації зони радіоактивного забруднення

Проведено аналогічних 100 ітерацій роботи імітаційної моделі, зібрано масив даних зафіксованих сенсорів кожного типу у зоні радіоактивного забруднення. Обраховані середні, максимальні та мінімальні значення наведено у таблиці (табл.4).

Таблиця 4

Отримані результати моделювання

	Статичні	Рухомі
count	100.000000	100.000000
mean	1.030000	7.460000
std	0.979126	2.059742
min	0.000000	2.000000
max	4.000000	10.000000

З результатів отримано, що мінімальні значення сенсорів статичного типу становить 0, в той час як сенсорів рухомого типу 10, що є максимальним значенням кількості сенсорів у даному експерименті. Середнє значення зафіксованих сенсорів рухомого типу становить 7, статичного 1 (рис.13).

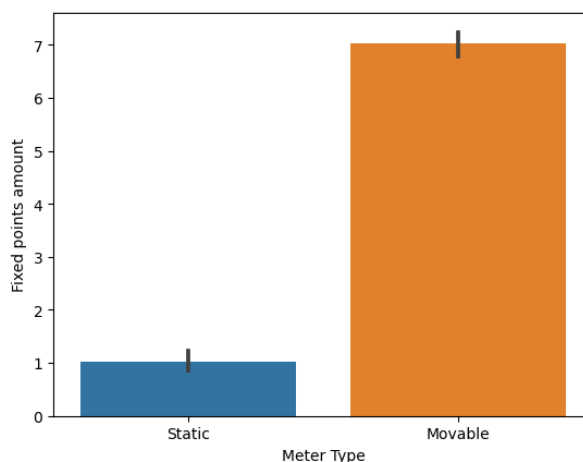


Рис.13. Середні значення зафіксованих сенсорів у зоні

У результаті порівняльних експериментів із використанням двох імітаційних моделей фіксації точок і зон радіоактивного забруднення за участю сенсорів рухомого та статичного типу отримано характеристики ефективності їхньої роботи в різних умовах. За однакових умов сенсори рухомого

типу продемонстрували значно вищу ефективність у зборі даних про радіоактивне забруднення порівняно зі статичними. Згідно з першою моделлю, яка симулює фіксацію випадкових точкових джерел радіації, рухомі сенсори фіксували у середньому у 45 разів більше забруднених позицій, ніж статичні. У другій моделі, яка передбачала моніторинг динамічного розширення зони забруднення, середній виграш становив близько 7 разів.

Висновок

У роботі проведено детальний аналіз вимог, підходів та ключових компонентів для створення мобільної кіберфізичної системи моніторингу та аналітики радіації в Україні. В результаті аналізу виявлено, що мобільність сенсорів є однією з ключових вимог для ефективного моніторингу, оскільки дозволяє охоплювати більші території та отримувати більш точні дані. Детально описано архітектуру основних компонентів пропонуваної мобільної кіберфізичної системи, до яких належать пристрій із сенсором радіаційного фону, мобільний додаток та серверна частина. Сенсорний пристрій побудовано на базі мікроконтролера ESP32, який оснащено вбудованими модулями безпроводного зв'язку. Мобільний додаток для операційної системи Android реалізує функції збору даних, їх відображення на інтерактивній карті та з'єднання з пристроєм-сенсором. Серверна частина відповідає за зберігання даних у NoSQL базі, аналітичну обробку та можливості у майбутньому прогнозування рівня радіаційного фону за допомогою нейронної мережі. Проведено порівняльне дослідження ефективності виявлення радіоактивних точок і зон забруднення за допомогою імітаційних моделей із використанням рухомих і статичних сенсорів. Результати показали суттєву перевагу рухомих сенсорів у точності та швидкості збору даних, що підтверджує доцільність використання моделі «Колектор – Смартфон – Сервер». Запропонована система має значні перспективи для впровадження як окреме рішення або як частина національної інфраструктури моніторингу, з можливістю інтеграції в існуючі системи безпеки. Залучення громадян і волонтерів до процесу моніторингу сприятиме розширенню географічного охоплення та підвищенню обізнаності населення щодо питань радіаційної безпеки.

Список використаних літературних джерел

- [1]. P. Nahar, V. K. Yadav, P. Goyal and U. Badhera, "Importance of IoT in Environment Monitoring: A Comparative Study of COVID19 Impacts on Air," 2024 1st International Conference on Sustainable Computing and Integrated Communication in Changing Landscape of AI (ICSCAI), Greater Noida, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSCAI61790.2024.10866556.
- [2]. E. P. Nyabel, C. Tumuhaise, E. Mugume, J. Serugunda and A. Kamagara, "Design and Implementation of a Low-Cost LoRa-Based Sensor Node for Environmental Monitoring in Uganda," 2024 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Portland, OR, USA, 2024, pp. 220-225, doi: 10.1109/SusTech60925.2024.10553434.
- [3]. M. -Ş. Nicolae, I. -D. Nicolae, R. -C. Presură Nicolae and P. -M. Nicolae, "Remote Monitoring of Environment Radiation with Arduino Wemos and Geiger Counter Sensors," 2023 Power Quality and Electromagnetic Compatibility at Low Frequency (PQEMC-LF), Craiova, Romania, 2023, pp. 77-80, doi: 10.1109/PQEMC-LF58184.2023.10211935.
- [4]. P. Tkachenko, "SaveEcoBot: A Public Information System for Environmental Protection in Ukraine," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 486-489, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755872.
- [5]. L. G. Manzano et al., "An IoT LoRaWAN Network for Environmental Radiation Monitoring," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-12, 2021, Art no. 6008512, doi: 10.1109/TIM.2021.3089776.

DEVELOPMENT OF A MOBILE CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR RADIATION MONITORING AND ANALYTICS IN UKRAINE

Volodymyr Pastukh, Mykola Beshley, Halyna Beshley

Lviv Polytechnic National University, S. Bandery Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine

The article presents the results of a study aimed at developing a mobile cyber-physical system for monitoring and analyzing radiation background, addressing current challenges in environmental safety. The relevance of the topic stems from the need for rapid response to radiation incidents, insufficient coverage of existing stationary monitoring systems, and the necessity to involve the public in environmental control processes. An intelligent system is proposed, built on the architecture model "Collector – Smartphone – Server," which ensures real-time data collection, transmission, processing, and visualization using modern wireless communication and computational analysis technologies. The main components of the system include a sensor device based on the ESP32 microcontroller with the GGreg20_V3 radiation sensor, an Android mobile application for device-server communication, and a server-side component for data processing and analytics using neural networks. To evaluate the effectiveness of the proposed mobile cyber-physical system, two separate simulation environments have been developed. Each environment allows the study of system behavior under conditions closely resembling real-world operation. The main idea behind modeling is to compare the performance of mobile sensor-based detection of radioactive contamination sources against traditional static solutions. The simulation results indicate that mobile sensors detect 7–45 times more instances of radioactive contamination compared to static solutions under identical conditions, highlighting the advantage of a mobile approach in detecting both localized sources and dynamic radioactive spread zones. These findings confirm the feasibility of implementing the developed system as an efficient solution for prompt radiation monitoring. The proposed system is scalable, accessible to a wide range of users, and can be integrated into national environmental monitoring infrastructure, with the potential for volunteer and citizen involvement in radiation safety processes..

Keywords: *mobile cyber-physical system, radiation monitoring, environmental safety, real-time data processing, wireless communication, radiation sensor, ESP32 microcontroller, GGreg20_V3 sensor, Android mobile application.*