



Д. В. Гончаренко, В. Б. Мокін

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

НЕЧІТКА ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ДЛЯ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ДАВАЧІВ ДЛЯ ІОТ-МОНІТОРИНГУ ЛІСОВОГО ГОСПОДАРСТВА

Наведено підхід до розроблення нечіткої експертної системи для визначення оптимальних місць встановлення давачів в енергоефективних IoT-рішеннях на підставі технології Sigfox. Особливу увагу приділено використанню геоінформаційних технологій (ГІС) і супутникових знімків для аналізу просторових і техногенних факторів, що впливають на розташування сенсорної мережі. Запропоновано систему, яка враховує широкий спектр екологічних параметрів, серед яких: рівень забруднення повітря, концентрація промислових викидів, індекс рослинності NDVI (англ. *Normalized Difference Vegetation Index*), температурні аномалії та близькість до потенційних джерел забруднення, таких як промислові підприємства, транспортні магістралі та сільськогосподарські угіддя. Основою експертної системи є нечітка база знань, яка дає змогу моделювати взаємозв'язки між техногенними та природними факторами, визначаючи ступінь доцільності встановлення давачів у конкретних локаціях. Алгоритм прийняття рішень базується на нечітких множинах і багатокритеріальному аналізі, що дає змогу враховувати як технічні характеристики давачів, так і особливості середовища, у якому вони працюватимуть. Це забезпечує підвищену гнучкість і адаптивність системи, навіть за умов значної невизначеності. Розроблено підхід, який дає змогу автоматизувати процес вибору точок встановлення давачів, що сприяє оптимізації витрат на розгортання та обслуговування мережі IoT. Експертну систему застосовано на прикладі інформаційної системи моніторингу стану лісових масивів, де ідентифіковано зони з підвищеним ризиком забруднення та за багатьма критеріями визначено оптимальні місця для встановлення давачів. Проведено дослідження, яке встановило, що інтеграція нечіткої логіки та ГІС дає змогу значно покращити ефективність екологічного моніторингу, забезпечуючи точніше визначення екологічно вразливих зон і мінімізуючи кількість необхідних давачів без втрати якості контролю. Запропонований підхід можна адаптувати до інших галузей, зокрема агропромислового комплексу, міських екологічних досліджень та моніторингу водних ресурсів. Використання такої експертної системи може сприяти зниженню операційних витрат, підвищенню надійності IoT-інфраструктури та покращенню екологічної ситуації у регіонах із підвищеним техногенним навантаженням.

Ключові слова: Інтернет речей; база знань; нечітка логіка; давачі; геоінформаційні технології; алгоритми оцінювання; сенсорна мережа.

Вступ / Introduction

Сучасний розвиток технологій Інтернету речей (IoT) відкриває нові можливості для екологічного моніторингу, зокрема у лісовому господарстві. Одним із ключових особливостей ефективного функціонування IoT-систем є оптимальне розміщення давачів, що забезпечує максимальне покриття контрольованої території за мінімальних витрат. В умовах розгортання IoT-мереж на підставі технології Sigfox, яка характеризується низьким енергоспоживанням, обмеженим розміром переданих даних і значним радіусом дії, особливого значення набуває завдання визначення оптимальних місць встановлення давачів.

У світовій науковій літературі активно досліджують питання енергоефективності IoT-рішень, методи їх інтеграції з Low Power Wide Area Network (LPWAN) технологіями, а також особливості оброблення екологічних даних. Проте проблема автоматизованого вибору

місць розміщення давачів з урахуванням техногенного впливу, стану довкілля та доступності мережевої інфраструктури залишається недостатньо вивченою. Враховуючи значні території, що охоплюють лісові масиви, а також економічні обмеження на встановлення великої кількості сенсорів, виникає потреба у розробленні інтелектуальних підходів до визначення оптимального їх розташування.

Об'єкт дослідження – визначення місць встановлення давачів для IoT-рішень у системах екологічного моніторингу лісових територій.

Предмет дослідження – методи та засоби вибору місць встановлення давачів для систем екологічного моніторингу лісового господарства, що дасть змогу мінімізувати їх кількість без втрати якості контролю.

Мета роботи – розробити нечітку експертну систему для підтримки прийняття рішень щодо визначення оптимальних місць встановлення давачів у IoT-систе-

Інформація про авторів:

Гончаренко Дмитро Валерійович, аспірант, кафедра системного аналізу та інформаційних технологій.

Email: honcharenko.d98@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-4903-9915>

Мокін Віталій Борисович, д-р техн. наук, професор, кафедра системного аналізу та інформаційних технологій.

Email: vbmokin@vntu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1946-0202>

Цитування за ДСТУ: Гончаренко Д. В., Мокін В. Б. Нечітка експертна система для пошуку оптимальних місць встановлення давачів для IoT-моніторингу лісового господарства. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 1. С. 155–164.

Citation APA: Honcharenko, D. V., & Mokin, V. B. (2025). Fuzzy expert system for finding optimal locations for sensor deployment for IoT in forest monitoring. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(1), 155–164. <https://doi.org/10.36930/40350119>

мах екологічного моніторингу лісового господарства, яка дасть можливість враховувати екологічні, техногенні та економічні чинники.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати наявні підходи до вибору місць встановлення давачів у LPWAN-мережах, що дасть змогу визначити переваги та недоліки кожного з них, а також обґрунтувати потребу використання адаптивних методів для визначення місць розташування давачів з урахуванням особливостей середовища;
- визначити основні техногенні та природні фактори, що впливають на ефективність розміщення сенсорів у лісових екосистемах, що дасть можливість створити комплексну методику оцінювання доцільності встановлення давача у певній локації та підвищити точність моніторингу стану довкілля;
- розробити експертну систему на підставі нечіткої логіки для підтримки прийняття рішень щодо розташування давачів і забезпечить гнучке та адаптивне визначення місць їхнього встановлення з урахуванням просторових обмежень та екологічних факторів;
- інтегрувати ГІС-аналіз та супутникові дані у процес вибору оптимальних точок для встановлення сенсорів, що допоможе підвищити точність визначення екологічно вразливих зон і мінімізувати витрати на розгортання сенсорної мережі;
- перевірити ефективність розробленої системи на практичному прикладі інформаційної IoT-системи моніторингу стану лісових масивів, що дасть змогу оцінити достовірність прийнятих рішень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні наукові дослідження приділяють увагу питанням оптимізації IoT-рішень, зокрема у контексті вибору давачів для інформаційно-вимірювальних систем. Дослідники [10, 20, 23, 32] наголошують на важливості енергоефективності, точності та сумісності давачів із технологіями LPWAN, серед яких технологія Sigfox займає важливе місце завдяки малому енергоспоживанню та значному радіусу дії. Проте, як свідчать роботи [4, 12, 18, 22], специфіка вибору та розташування давачів для мереж Sigfox залишається недостатньо висвітленою.

Автори дослідження [12] пропонують моделі для вибору давачів залежно від умов експлуатації та передбачуваних технічних обмежень. Водночас, у роботах [5, 38, 39] зазначено, що використання нечіткої логіки та експертних систем дає змогу враховувати складну взаємодію між числовими параметрами, такими як точність вимірювання, енергоспоживання та стійкість до умов середовища. Однак, як наголошують автори [5], недостатньо уваги приділяють інтеграції таких підходів до реальних IoT-застосунків.

У роботі [40] розглянуто нечіткі експертні системи на підставі функцій належності та нечітких правил. Автори вважають, що наразі основна увага в області штучного інтелекту зосереджена на створенні машин, які можуть демонструвати певну форму інтелекту. Точні математичні моделі не завжди існують і не можуть бути отримані для всіх складних середовищ, оскільки область може бути не повністю зрозуміла. Рішення полягає у створенні правил, які можна застосувати, коли вхідні значення знаходяться у певних категоріях, визначених аналітиком. Основний недолік наявного підходу полягає у визначенні категорій, які називаються функціями приналежності для кожного вхідного параметра, тобто використання цього методу вимагає певної форми експертних знань, щоб визначити ці функції приналежності. Тоді ефективність або точність нечіткої системи пропорційна досвіду аналітика в області застосування. База знань в експертній системі може поступово зростати та динамічно оновлюватися; щоб можна було підвищити продуктивність експертної системи. Автори пропонують загальний метод навчання моделі експертної системи як основи для автоматичного отримання функцій приналежності та нечітких правил if then із набору наведених навчальних прикладів для швидкого створення прототипу нечіткої експертної системи. На підставі функцій належності та отриманих нечітких правил також було розроблено відповідну процедуру нечіткого висновку для оброблення вхідних даних.

Вагомий внесок у розвиток експертних систем для IoT було зроблено в дослідженнях, що стосуються застосування нечіткої логіки [35]. Однак аналіз літератури свідчить про те, що поєднання методів ГІС-аналізу, супутникових даних і нечіткої логіки для визначення оптимальних місць встановлення давачів у мережах Sigfox потребує подальших досліджень. Зокрема, залишається відкритим питання щодо визначення мінімальної кількості сенсорів, необхідних для якісного моніторингу, та їх стратегічного розташування для забезпечення стабільної передачі даних і мінімізації витрат.

Отже, проведений аналіз вказує на потребу розроблення підходу, що поєднує ГІС, супутникові технології та експертні системи для вибору місць встановлення сенсорів. Запропонована система дасть змогу забезпечити оптимальний баланс між точністю моніторингу, витратами на розгортання IoT-інфраструктури та стабільністю роботи в умовах неповної інформації та техногенних обмежень.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводили з використанням методів геоінформаційного аналізу, нечіткої логіки та просторового моделювання. Для розроблення експертної системи було застосовано середовище Matlab із використанням інструменту Fuzzy Logic Toolbox, що дає змогу формалізувати знання про фактори, які впливають на доцільність встановлення давачів. Додатково використовували ГІС, зокрема OpenStreetMap, OneSoil та IQAir Air Quality Map, для збирання та аналізу просторових даних.

Методологія дослідження передбачала виконання декількох ключових етапів:

1. Збирання та оброблення просторових даних – аналіз супутникових знімків і картографічної інформації для ідентифікації потенційних джерел забруднення, транспортних вузлів і інших техногенних факторів, що можуть впливати на потребу встановлення давачів;
2. Формалізація експертних оцінок – визначення набору лінгвістичних змінних і правил нечіткої логіки для оцінювання впливу факторів на ефективність розміщення сенсорів.
3. Розроблення нечіткої експертної системи – побудова бази знань, що враховує рівень забруднення повітря, концентрацію промислових викидів, індекс рослинності, температурні аномалії та відстань до джерел забруднення.
4. Агрегація та аналіз даних – застосування алгоритмів багатокритеріального аналізу та деафікації для отримання конкретних рекомендацій щодо місць встановлення давачів.

Методологія дослідження базується на послідовному виконанні кількох ключових етапів [25]. Спочатку збирали та обробляли просторові дані, зокрема супут-

никові знімки і картографічну інформацію, для ідентифікації потенційних джерел забруднення, транспортних вузлів та інших техногенних факторів, що можуть впливати на доцільність встановлення давачів. Далі проводили формалізацію експертних оцінок шляхом визначення лінгвістичних змінних і побудови правил нечіткої логіки, що дає змогу оцінювати вплив різних факторів на ефективність розміщення сенсорів. На підставі отриманих даних було розроблено нечітку експертну систему, яка враховує рівень забруднення повітря, концентрацію промислових викидів, індекс рослинності, температурні аномалії та відстань до джерел забруднення. Для отримання підсумкових висновків застосовувалися алгоритми багатокритеріального аналізу та методи дефазифікації, що дало змогу сформулювати конкретні рекомендації щодо оптимального розташування давачів.

Особливу увагу було приділено розробленню адаптивного підходу до вибору місць встановлення давачів, який дає змогу коригувати результати на підставі нових даних і мінімізувати кількість сенсорів. Це забезпечує ефективне використання ресурсів і підвищує надійність системи, навіть у складних умовах та за значної невизначеності.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Передумови розроблення експертної системи. Розгортання мережі IoT на підставі технології Sigfox для моніторингу стану лісів потребує значних фінансових ресурсів, зокрема для закупівлі давачів, їх встановлення, обслуговування та забезпечення безперебійного функціонування мережі передачі даних. Лісові масиви охоплюють значні території, і розміщення давачів по всьому периметру без урахування локальних особливостей є неефективним з економічної та технічної точок зору. Встановлення великої кількості пристроїв призведе до зростання експлуатаційних витрат, а також створить труднощі у забезпеченні стабільного зв'язку та живлення для кожного окремого пристрою.

Натомість, більш раціональним підходом є використання експертної системи для визначення найбільш вразливих точок, де ймовірність забруднення є найвищою. Такий підхід базується на аналізі геоінформаційних даних, супутникових знімків і екологічних моделей, що дають змогу ідентифікувати потенційно небезпечні об'єкти поблизу лісових територій. Використовуючи ці дані, можна визначити зони з підвищеним ризиком забруднення, такі як ділянки біля промислових підприємств, автомобільних магістралей, зон видобутку корисних копалин і сільськогосподарських полів, де можливе застосування пестицидів і гербіцидів.

Проектування експертної системи. Технологія Sigfox, як одна із ключових LPWAN-технологій, надає можливості для передачі даних з низьким енергоспоживанням та значною відстанню зв'язку [29]. Ця технологія ідеально підходить для IoT-рішень, які потребують передачі невеликих обсягів даних від давачів, встановлених у віддалених або важкодоступних місцях. Проте, визначення місця ефективного розташування кожного давача потребує врахування умов навколишнього середовища, яке цей давач буде моніторити.

Давачі є ключовим компонентом інформаційних IoT систем на базі технології Sigfox, забезпечуючи збирання і передачу даних про фізичні параметри довкілля. Їх

вибір, налаштування та координати місця встановлення впливають на точність, енергоефективність і надійність всієї системи [19].

Одним із важливих завдань моніторингу довкілля є контроль екологічного стану лісових територій, особливо в контексті виявлення забруднень та оцінювання стану дерев. У безпосередній близькості до лісу можуть розташовуватися різні інфраструктурні об'єкти, які потенційно є джерелами техногенного впливу. Визначення ефективних місць встановлення давачів для контролю параметрів довкілля потребує врахування просторових і кліматичних факторів, а також джерел можливого забруднення. Оскільки площі лісових масивів мають неоднорідну форму та часто є протяжними, доцільно розбити їх на квартали і розглядати кожен такий квартал як самостійний об'єкт.

Для автоматизації процесу вибору оптимальних місць розташування давачів доцільно використовувати геоінформаційні системи, які дають змогу інтегрувати дані супутникового моніторингу, картографічні ресурси та інші джерела просторової інформації. Інтеграція ГІС-технологій в експертну систему дасть змогу автоматизувати ідентифікацію потенційних джерел забруднення та аналізувати екологічні умови, що, водночас, сприятиме підвищенню ефективності розміщення сенсорної мережі та зменшенню витрат на польові дослідження.

Для вирішення поставленого завдання потрібно виконати такі кроки [31]:

1. Вибрати, формалізувати та структурувати фактори, які впливають на розташування давачів для розумних IoT-рішень.
2. Розробити експертну систему на підставі нечіткої моделі оцінювання впливу зазначених факторів на вибір місць встановлення сенсорів.
3. Запропонувати алгоритм оптимізації розташування давачів з урахуванням додаткових просторових і екологічних факторів.

Аналіз літературних джерел показує, що основними чинниками, які необхідно враховувати під час визначення місць встановлення IoT-давачів, є такі [21, 37]:

1. Техногенний вплив:
 - відстань до промислових об'єктів (d) – розташування лісу відносно заводів, підприємств, транспортних магістралей тощо;
 - кількість промислових викидів (e) – обсяг та склад забруднювальних речовин, що викидаються в атмосферу, є важливими параметрами під час оцінювання стану повітря та потенційного забруднення ґрунту і води.
2. Якість довкілля:
 - рівень забруднення повітря (p) – концентрація твердих частинок, оксидів азоту, діоксиду сірки та інших шкідливих речовин;
 - індекс рослинності (v) – нормалізований диференціальний вегетаційний індекс є важливим показником стану рослинного покриву, оскільки зниження значень NDVI може свідчити про деградацію лісу;
 - температурні аномалії (t) – локальні зміни температурного режиму, зокрема підвищення температури в певних ділянках, можуть вказувати на негативний вплив промислової діяльності, зниження рівня вологості або зміну мікроклімату.

Для формалізації експертних оцінок обраних факторів застосовано універсальну множину (1), що дає змогу формалізувати рівні впливу уніфікованим способом. Подібний підхід використовують у нечітких експертних системах для створення шкали оцінювання, яка дає змо-

гу моделювати невизначеність і поступову зміну значень факторів [7]. Вибір дискретного поділу на рівномірні інтервали забезпечує достатню точність при обчисленнях, зберігаючи при цьому низьку обчислювальну складність. Надалі значення з множини U використовуються для визначення функцій належності терм-множин, що описують різні рівні впливу параметрів.

$$U = \{0, 0,1, 0,2, \dots, 1\}. \quad (1)$$

Для кожної лінгвістичної змінної пропонуємо використовувати терм-множину, що складається з трьох елементів:

$$X = \{ "H", "C", "B" \}, \quad (2)$$

де: "H" – "Низький", "C" – "Середній", "B" – "Високий" потенційний техногенний вплив на ліс.

Терм-множини, використані для оцінювання лінгвістичних змінних факторів, наведено в табл. 1.

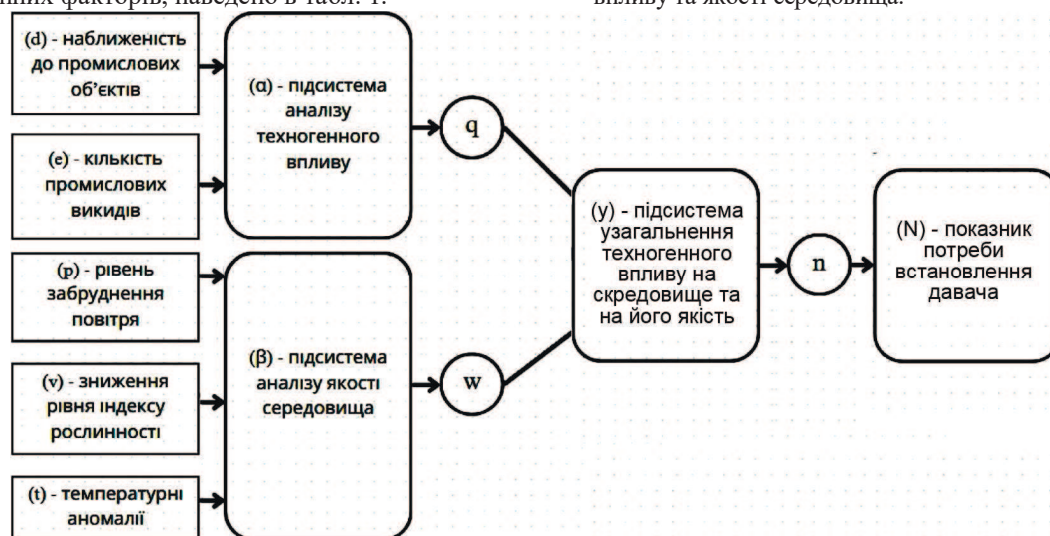


Рис. 1. Структура моделі нечіткої бази знань / Structure of a fuzzy knowledge base model

Нечітка база знань містить підсистеми аналізу техногенного впливу, якості середовища та їх узагальнення, що визначають потребу встановлення давачів залежно від факторів їх інтенсивності.

Кожному елементу терм-множини (2) відповідає значення на універсальній множині (1) через функцію належності $\mu_X(u)$, яку задано у вигляді дзвіноподібної Гауссової функції [18]:

$$\mu_X(u) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u - m_X}{\sigma_X} \right)^2 \right], \quad (3)$$

де: параметр m_X – це значення універсальної множини; σ_X – параметр, що характеризує розкид значень навколо m_X .

У табл. 2, 3 та 4 наведено нечіткі бази знань експертних оцінок, які використовуються для визначення параметрів d, e, q, p, v, t, w . Експертні оцінки отримали фахівці-експерти з урахуванням результатів досліджень, наведених у роботах [30, 15], та у роботі з інтеграції ГІС-систем [34]. Для оцінювання впливу техногенних і екологічних факторів використовувалися терм-множини: "Низький", "Середній", "Високий". Такий підхід дає змогу якісно класифікувати рівень техногенного навантаження (відстань до промислових об'єктів, обсяг викидів) та стан довкілля (забруднення повітря, індекс рослинності, температурні аномалії), що забезпечує комплексну оцінку доцільності встановлення давачів у певних зонах. Проміжні фактори впливу (e, w) та результатний показник (u) оцінювали терм-множиною: "Низький", "Середній", "Високий" (табл. 4).

Табл. 1. Фактори впливу та відповідні їм терм-множини експертних оцінок / Influence factors and their corresponding term sets of expert evaluations

Позначення	Терм-множина	Вага
d	"Низький", "Середній", "Високий"	0,3
e		0,2
p		0,3
v		0,1
t		0,1

На рис. 1 відображено структуру моделі, що містить три підсистеми:

- $q = \alpha(d, e)$ – підсистема аналізу потенційного техногенного впливу на ліс;
- $w = \alpha(p, v, t)$ – підсистема аналіз середовища поблизу лісу;
- $w = \beta(p, v, t)$ – підсистема аналіз середовища поблизу лісу;
- $n = \gamma(q, w)$ – підсистема узагальнення техногенного впливу та якості середовища.

Функції належності для терм-множин було визначено за допомогою дзвіноподібної функції належності, параметри якої встановлено на підставі методу парних порівнянь [9]. Побудову нечіткої бази знань здійснено в середовищі Matlab з використанням інструменту Fuzzy Logic Toolbox.

Залежність між рівнем забруднення повітря, кількістю промислових викидів і показником доцільності встановлення давача зображено на рис. 2.

Табл. 2. Нечітка база знань підсистеми α / Fuzzy knowledge base of the subsystem α

№	d	e	q
1	Низький	Середній	Низький
2	Низький	Високий	Середній
3	Середній	Низький	Низький
4	Середній	Високий	Високий
5	Високий	Низький	Середній
6	Високий	Середній	Високий

Табл. 3. Нечітка база знань підсистеми β / Fuzzy knowledge base of the subsystem β

№	p	v	t	w
1	Низький	Низький	Середній	Низький
2	Низький	Середній	Низький	Низький
3	Низький	Середній	Високий	Середній
4	Низький	Високий	Середній	Середній
5	Середній	Низький	Високий	Середній
6	Високий	Низький	Низький	Низький
7	Високий	Низький	Високий	Високий
8	Високий	Середній	Високий	Високий

Табл. 4. Нечітка база знань підсистеми γ /
Fuzzy knowledge base of the subsystem γ

№	e	w	u
1	Низький	Середній	Низький
2	Середній	Низький	Низький
3	Низький	Високий	Середній
4	Високий	Низький	Середній
5	Середній	Високий	Високий
6	Високий	Середній	Високий

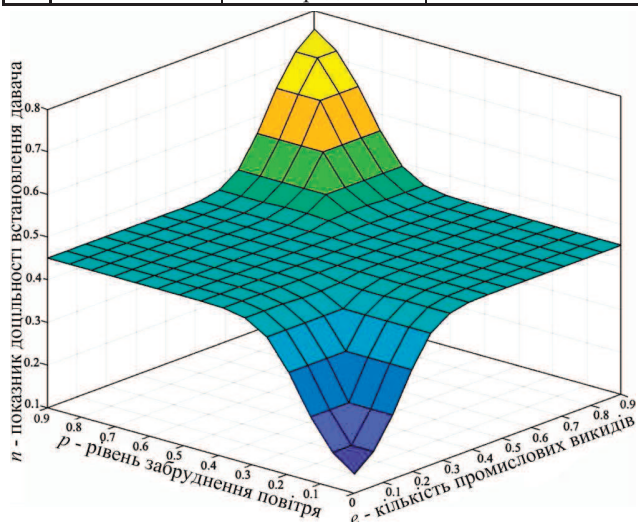


Рис. 2. Вплив рівня забруднення повітря та кількості промислових викидів на місце розміщення давача / Impact of air pollution level and industrial emissions on the sensor placement point

Для узагальнення правил здійснюється процедура агрегування нечітких вихідних значень у єдину інтегровано



Рис. 3. Структура комплексної інформаційної системи / Structure of an Integrated Information System [24]

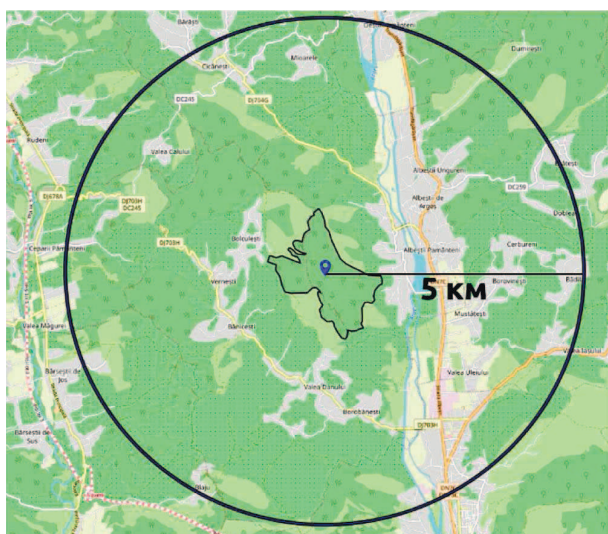


Рис. 4. Буферна зона навколо лісу / Buffer zone around the forest

Для розгортання мережі Sigfox та створення інформаційної системи моніторингу стану лісу було визначено географічну точку координат частини лісової території з використанням даних OpenStreetMap. Навколо цієї точки сформовано буферну зону радіусом 5 км, що

вану нечітку множину, яка згодом піддається дефазифікації для отримання чіткого початкового значення у роботі [33].

Інтеграція ГІС-систем. Інтеграція геоінформаційних систем (ГІС) у процес прийняття рішень значно підвищує ефективність екологічного моніторингу, зокрема під час визначення ефективного розташування давачів. Використання ГІС дає змогу враховувати просторові та техногенні фактори, аналізувати супутникові дані, виявляти екологічні ризики та прогнозувати зміни довкілля [6, 26]. Основними перевагами інтеграції ГІС-систем в експертну систему є такі [17]:

- просторова прив'язка даних, що дає змогу ідентифікувати зони підвищеного впливу техногенних факторів;
- аналіз екологічних змін за допомогою супутникових знімків;
- оптимізація розташування давачів шляхом кластеризації та просторової аналітики.

Завдяки інтеграції ГІС, отримані дані використовуються як вхідні параметри нечіткої бази знань. Зокрема, це – відомості про наявність техногенних об'єктів неподалік, стан навколишнього середовища, кліматичні умови та інші просторові фактори. Отримані параметри дають змогу експертній системі формувати обґрунтовані рішення щодо необхідності встановлення давачів у певних зонах.

На підставі роботи [24] запропоновано вдосконалену структуру комплексної інформаційної системи, що охоплює ГІС, нечітку експертну систему та модуль оптимізації розташування давачів. Її схематичне зображення подано на рис. 3.

потенційно дає змогу враховувати можливий вплив зовнішніх факторів на екосистему лісу (рис. 4).

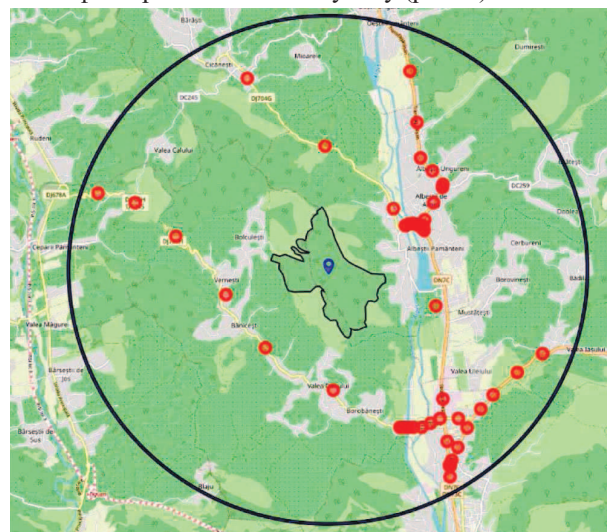


Рис. 5. Потенційні техногенні об'єкти поблизу лісу / Potential technogenic objects near the forest

За допомогою вебінструментів аналізу карт "Overpass turbo" здійснено ідентифікацію об'єктів, розташова-

них у межах буферної зони, які можуть становити потенційні техногенні перешкоди (див. рис. 5).

Проведений аналіз містив визначення промислових підприємств, транспортних магістралей, сільськогосподарських угідь та інших об'єктів, що можуть впливати на стан довкілля. Для кожного з цих об'єктів отримано відповідну інформацію, зокрема про їхню категорію, координати, тип діяльності та потенційні викиди забруднювальних речовин.

Для визначення індексу рослинності в межах досліджуваної території інтегровано систему "OneSoil" – сучасний вебінструмент для аналізу стану рослинного покриву на підставі супутникових даних [28]. Система OneSoil використовує алгоритми оброблення зображень Sentinel-2 та інших супутникових платформ для оцінювання вегетаційного індексу NDVI (англ. *Normalized Difference Vegetation Index*), що дає змогу відстежувати зміни у здоров'ї рослинності в режимі реального часу. У разі виявлення сільськогосподарських полів, розташованих поблизу лісових масивів, здійснюється аналіз ділянок із зниженим NDVI (рис. 6).

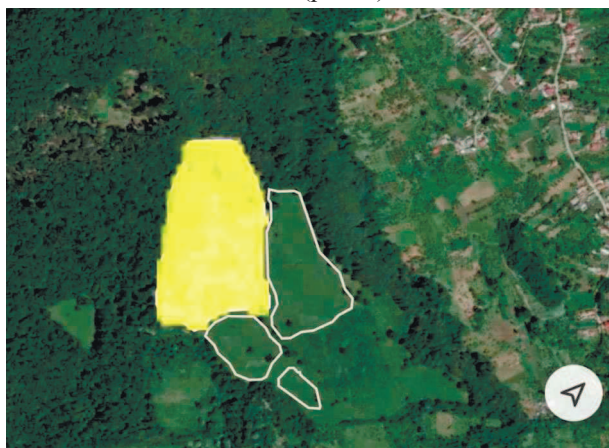


Рис. 6. Рівень NDVI поля поблизу лісу / NDVI level of the field near the forest

Зниження значення індексу NDVI може свідчити про вплив таких факторів як: застосування пестицидів і агрохімікатів, розвиток захворювання у рослин, дефіцит поживних речовин. Отримані дані є цінними для оцінювання можливого негативного впливу аграрної діяльності на лісові масиви.

Для оцінювання якості повітря в межах досліджуваної території було інтегровано геоінформаційну систему IQAirVisual, розроблену швейцарською компанією IQAir, що спеціалізується на технологіях захисту від атмосферних забруднень, розробленню систем моніторингу повітря та засобів його очищення [16]. Ця платформа забезпечує моніторинг концентрації основних забруднювальних речовин в атмосферному повітрі, зокрема PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO та O₃, шляхом агрегування даних із супутникових знімків, державних станцій спостереження. Система не надає точних даних для конкретної області, проте загальні показники якості повітря регіону дають змогу ідентифікувати зони підвищеного екологічного ризику.

Отже, модуль аналізу даних ГІС забезпечує об'єднання даних з різних ГІС-систем (OpenStreetMap, OneSoil, IQAirVisual) та формує вхідні параметри для нечіткої експертної системи. На підставі просторового аналізу визначають ключові показники, такі як рівень техногенного впливу, стан рослинного покриву, якість по-

вітря та кліматичні фактори. Отримані дані використовуються [28] для прийняття рішень щодо необхідності встановлення давачів моніторингу.

Застосування експертної системи. Спробуємо застосувати експертну систему для визначення оптимальних місць розташування давачів у лісовому господарстві на прикладі системи моніторингу стану лісових масивів на підставі Інтернету речей і технології Sigfox.

Інформаційна система моніторингу стану лісових масивів необхідна для своєчасного виявлення небезпек, пов'язаних із змінами клімату та деградацією екосистем. Її завданням є забезпечення збирання, передачі та аналізу даних про ключові параметри довкілля, що дає змогу оперативного реагувати на зміни та приймати обґрунтовані рішення щодо охорони лісових масивів.

Обрано частину лісового масиву неподалік одного з європейських міст, для якого потрібно встановити давачі та розгорнути систему моніторингу. За допомогою ГІС визначено об'єкти, які можуть забруднювати лісову екосистему. На рис. 7 подано позначення цих об'єктів, а саме синім колом виділено зону охоплення системи ГІС-аналізу, червоними колами позначено потенційні можливі джерела техногенного впливу. Рожевими – можливі точки встановлення давачів, відповідно до аналізу місцевості.

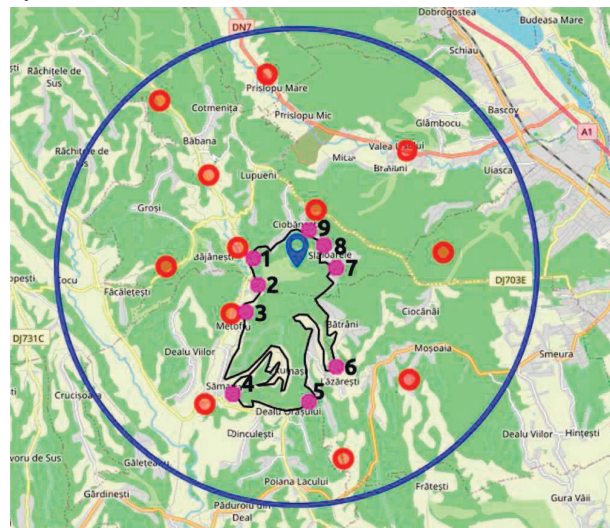


Рис. 7. Вплив діапазону вимірювання та енергоспоживання давача на його відповідність умовам завдання / Impact of measurement range and energy consumption of the sensor on its suitability for the task conditions

Відповідно до напрямів потенційних загроз, обрано 9 точок навколо лісового масиву для можливого встановлення давачів. Для визначення доцільності встановлення давачів у кожній з цих точок використаємо систему нечітких баз знань (табл. 5).

Табл. 5. Система нечітких баз знань / System of fuzzy knowledge bases

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9
d	8	4	9	6	5	5	3	6	8
e	8	2	6	3	6	7	7	2	2
p	6	2	7	3	7	7	7	3	3
v	4	3	5	3	4	5	5	2	2
t	3	1	2	1	3	3	2	1	1
N	0,65	0,26	0,67	0,36	0,55	0,58	0,56	0,34	0,4
N_{min}	0,21	0,13	0,31	0,13	0,18	0,19	0,2	0,15	0,18
N_{disp}	0,52	0,13	0,68	0,32	0,25	0,38	0,52	0,32	0,62
N_{σ}	0,28	0,14	0,26	0,17	0,15	0,19	0,22	0,17	0,24

Враховуючи частку співвідношення результатів (показник доцільності переважає 50 %), на практиці потрібно розглядати як ефективні для розміщення давачів варіанти 1, 3, 5, 6, 7. Проте експертна система не враховує зону покриття базовими станціями мережі Sigfox (у разі, якщо розгортання системи відбувається на наявних базових станціях) та економічні особливості встановлення давачів.

Використовуючи підхід [14], формалізуємо завдання на підставі експертної інформації. Місця розташування, які експертна система визначила недоцільними, надалі не враховуються. Порівняння характеристик давача здійснюється за такими критеріями: X_1 – доцільність встановлення, X_2 – мінімальне значення доцільності, X_3 – дисперсія доцільності, X_4 – покриття мережі Sigfox, X_5 – вартість встановлення.

Як інтегральний критерій використовують класичний критерій J_X , де w_i – вага i -го критерію, що визначають експерти, аналізуючи умови завдання [27]:

$$J_X = \sum_{i=1}^N w_i X_i. \quad (4)$$

Визначення оптимальних місць розташування давача можна трактувати як задачу оптимізації, метою якої є оцінювання доцільності встановлення давача у точці, залежно від ключових критеріїв. Формулювання завдання полягає в такому: необхідно мінімізувати витрати на встановлення давача у місці зі стабільним покриттям станцій мережі Sigfox при задоволенні таких обмежень [8]:

- показник доцільності встановлення давача повинен бути не меншим від заданого значення D_{min} ;
- показник покриття базовими станціями мережі Sigfox повинен відповідати заданому діапазону $S_{min} - S_{max}$;
- вартість встановлення має бути якомога меншою C_{min} ;

Задачу формалізовано у вигляді моделі лінійного програмування, оскільки всі критерії оптимізації є лінійними. Оптимальними місцями розташування є ті, в яких критерій (1) буде набувати найбільших значень [24]:

$$J_j = \sum_{i=1}^N w_i X_{ij}, j = 1, 2, 3, \dots, AX \geq B, \quad (5)$$

де: X_{ij} ($j = 1, 2, 3, \dots$) – значення критеріїв для кожної з потенційних точок розміщення; X – їх векторне наведення; B – вектор обмежень на критерії.

Для визначення оптимальних місць розташування станції мережі Sigfox застосовано бібліотеку PuLP у Python, яка дає змогу формалізувати оптимізаційні моделі та знаходити оптимальні рішення за допомогою різних методів, таких як симплекс-метод або метод внутрішніх точок. Унаслідок розв'язання задачі лінійного програмування засобами бібліотеки PuLP у Python отримано результати, подані у табл. 6.

Табл. 6. Результат багатокритеріального аналізу / Result of the multi-criteria analysis

Критерій	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	J
Ваги	0,4	0,05	0,05	0,3	0,2	
N_1	0,65	0,21	0,52	0,3	0,5	0,49
N_3	0,67	0,31	0,68	0,3	0,5	0,51
N_5	0,55	0,18	0,25	0,2	0,4	0,38
N_6	0,58	0,19	0,38	0,1	0,3	0,35
N_7	0,56	0,2	0,52	0,1	0,3	0,35

Отримані результати свідчать про те, що за умов обмеженого фінансування можна знехтувати розташуванням сенсорів у точках 6 та 7, проте це погіршить кількісні показники моніторингу. Отже, оптимальними точками розміщення давачів на рис. 7 є варіанти 1, 3, 5, як показано на рис. 8.

кісні показники моніторингу. Отже, оптимальними точками розміщення давачів на рис. 7 є варіанти 1, 3, 5, як показано на рис. 8.

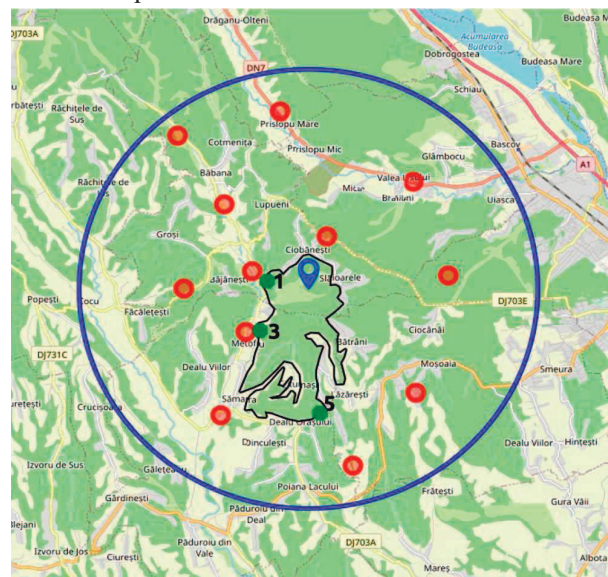


Рис. 8. Точки оптимального розміщення давачів / Points of optimal locations of the sensor deployment

Отримані результати дослідження підтверджують ефективність розробленого підходу до вибору оптимальних місць встановлення давачів у мережах IoT на базі технології Sigfox. Запропонована нечітка експертна система, інтегрована з геоінформаційними технологіями, дає змогу автоматизувати процес ухвалення рішень, що знижує експлуатаційні витрати, мінімізує кількість давачів без втрати точності моніторингу та підвищує адаптивність системи до змін у просторових і техногенних умовах. Отже, розроблений метод є вагомим внеском в удосконалення інтелектуальних систем екологічного моніторингу, що може бути адаптовано для різних сфер екологічного моніторингу.

Обговорення результатів дослідження. У роботі [36] автори вирішують завдання прогнозування появи шкідників на сільськогосподарських культурах, таких як рис та просо, використовуючи нечітку логіку. Їхній метод базується на аналізі даних про температуру, вологість та опади, які збираються за допомогою IoT-давачів. Дані, зібрані через IoT-інфраструктуру, аналізуються системою на предмет розмноження шкідників. Автори стверджують, що результати дослідження підтверджують істотний вплив погодних чинників на появу шкідників і хвороб. Проте вони не врахували можливість інтеграції з ГІС. Завдяки такому поєднанню можна досягти збільшення результативності системи моніторингу та зменшити кількість давачів.

У дослідженні [13] наведено всебічний аналіз сучасних алгоритмів оптимізації, які застосовуються в системах моніторингу стану конструкцій (МСК) та для вирішення завдання оптимального розміщення давачів (ОРД). Автори детально розглядають різні особливості МСК, враховуючи типи давачів, методи виявлення пошкоджень та алгоритми оброблення даних. Незважаючи на ґрунтовний аналіз, автори статті не приділяють достатньої уваги застосуванню нечіткої логіки в системах МСК та для ОРД, яка є потужним інструментом для оброблення невизначеності та нечіткості.

У роботі [1] автори розробили систему моніторингу як води, встановлену в університеті Brawijaya. Вони

використовують давачі для вимірювання TDS, pH та потоку води, а також передають дані через мережу Wi-Fi для подальшого аналізу та відображення на вебсайті. Хоча спроектована система моніторингу вирішує поставлені завдання, але економічні витрати на її розгортання можна значно зменшити. Оскільки дані від давачів передаються періодично, доцільніше використати мережу Sigfox, яка споживає набагато менше енергії та використовує глобальну мережу базових станцій, не потребуючи локальної інфраструктури, як Wi-Fi.

У дослідженні [3] проаналізовано проблему оптимального проектування мережі для збирання даних у розумних середовищах за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Автори пропонують підхід, який оптимізує кількість давачів за допомогою мінімальної кількості БПЛА, враховуючи обмеження мережі. Для знаходження майже оптимального рішення застосовують ймовірнісний метод навчання. Це дослідження є актуальним і важливим для покращення ефективності мереж IoT, оскільки воно пропонує ефективне використання БПЛА для збирання даних з давачів у складних умовах. Однак застосування нечіткої експертної системи могло б значно полегшити визначення оптимальних точок розміщення давачів, а також зменшити їх кількість без втрати ефективності.

Розроблення бездротового IoT-давача для моніторингу температури та вологості у тваринництві з використанням мережі Sigfox наведеного в роботі [11], дає змогу збирати реальні дані для покращення умов для худоби, зменшення теплового стресу та оптимізації управління тваринництвом. Використання технології LPWAN та технології Sigfox забезпечує значну економію енергії, що є важливим для довготривалої роботи давачів в умовах, де розгортання власних мереж є обмеженим. Однак, незважаючи на ефективність такої розробки, автори не проводили дослідження щодо оптимальних місць розташування таких пристроїв, що могло б значно покращити ефективність їх використання у тваринництві.

Проведений аналіз літературних джерел засвідчив, що, хоча в наукових роботах активно досліджують методи оптимізації розташування давачів для IoT-систем, жоден із розглянутих підходів не поєднує нечітку логіку, геоінформаційні технології та супутникові знімки для визначення оптимальних місць встановлення давачів у мережі Sigfox. Запропонована в нашому дослідженні експертна система враховує просторові та техногенні фактори в автоматизованому режимі, що дає змогу підвищити ефективність моніторингу екологічного стану територій.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено нечітку експертну систему для визначення оптимальних місць встановлення IoT-давачів у мережі Sigfox із застосуванням в інформаційній системі моніторингу лісового господарства, яка використовує дані із геоінформаційних систем і супутникових знімків.

Практична значущість результатів дослідження – експертну систему можна використати для автоматизованого вибору місць встановлення давачів у системах моніторингу довкілля, застосувати для оптимізації процесу розгортання IoT-мереж на підставі технології Sigfox з урахуванням просторових і техногенних факторів.

Висновки / Conclusions

Розроблено нечітку експертну систему для підтримки прийняття рішень щодо визначення оптимальних місць розташування давачів у IoT-системах моніторингу лісового господарства, що використовують технологію Sigfox, яка дає можливість враховувати екологічні, техногенні та економічні фактори. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано підходи до вибору місць встановлення давачів у LPWAN-мережах та виявлено їх недоліки та переваги, що дає змогу обґрунтувати потребу застосування адаптивних методів визначення оптимального розташування давачів з урахуванням характеристик довкілля.
2. Визначено основні техногенні та природні фактори, що впливають на ефективність розміщення давачів у лісових екосистемах, що стало основою для формування методики оцінювання доцільності встановлення давачів у певних локаціях.
3. Розроблено підхід до автоматизованого вибору місць встановлення давачів, що забезпечує врахування техногенного впливу, стану довкілля та доступності мережевої інфраструктури, що дає змогу мінімізувати кількість сенсорів без втрати якості моніторингу.
4. Запропоновано методику інтеграції нечіткої логіки та ГІС-аналізу, що дає змогу здійснювати оцінювання рівня забруднення повітря, індексу рослинності NDVI, температурних аномалій та відстані до джерел забруднення, забезпечуючи адаптивне прийняття рішень щодо встановлення давачів.
5. Розроблено нечітку базу знань та систему правил експертного оцінювання взаємозв'язку між природними та техногенними факторами, що дає змогу підвищити точність прогнозування оптимальних місць для розташування сенсорної мережі.
6. Застосовано експертну систему на прикладі системи моніторингу лісового господарства для визначення оптимальних місць розташування давачів, що дає змогу врахувати різні природні та техногенні фактори.

References

1. Abidin, Z., Maulana, E., Nurrohmah, M. Y., Candra Wardana, F., & Warsito. (2022). Real Time Monitoring System of Drinking Water Quality Using Internet of Things. In: *2022 International Electronics Symposium (IES)*, Surabaya, Indonesia, 131–135. <https://doi.org/10.1109/ies55876.2022.9888400>
2. Adam, M. E., & Hamid, Y. A. A. (2022). A Two-Stage Assessment Approach for QoS in Internet of Things based on Fuzzy Logic. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(4), 214–229. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2022.0130480>
3. Ahmed, A., Naeem, M., & Al-Dweik, A. (2021). Joint Optimization of Sensors Association and UAVs Placement in IoT Applications with Practical Network Constraints. *IEEE Access*, 1, 165–179. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3049360>
4. Alhomayni, H., Fadel, M., Dimitriou, N., Bakhsh, H., & Aldabbagh, G. (2024). Modeling the Performance of a Multi-Hop LoRaWAN Linear Sensor Network for Energy-Efficient Pipeline Monitoring Systems. *Applied Sciences*, 14(20), 9375–9391. <https://doi.org/10.3390/app14209391>
5. Belson, B., Holdsworth, J., Xiang, W., & Philippa, B. (2019). A Survey of Asynchronous Programming Using Coroutines in the Internet of Things and Embedded Systems. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 18(3), 1–21. <https://doi.org/10.1145/3319618>
6. Cao, H., & Wachowicz, M. (2019). The design of an IoT-GIS platform for performing automated analytical tasks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 74, 23–40. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.11.004>

7. Carter, J., Chiclana, F., Khuman, A. S., & Chen, T. (2021). Fuzzy Logic. *Springer International Publishing*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-66474-9>
8. Coverage – Sigfox OG Technology. Sigfox OG Technology. URL: <https://sigfox.com/coverage>
9. Farrell, J. E. (2001). Efficient method for paired comparison. *Journal of Electronic Imaging*, 10(2), 388–394. <https://doi.org/10.1117/1.1344187>
10. Gomez, C., Veras, J. C., Vidal, R., Casals, L., & Paradells, J. (2019). A Sigfox Energy Consumption Model. *Sensors*, 19(3), 672–681. <https://doi.org/10.3390/s19030681>
11. Grané, M., Martínez, J. D., Arnaud, A., Puyol, R., & Miguez, M. (2024). A Sensor Network Using Sigfox for Temperature and Humidity Monitoring in the Livestock Industry. In: *2024 IEEE 15th Latin America Symposium on Circuits and Systems (LAS-CAS), Punta del Este, Uruguay, 2024*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/lascas60203.2024.10506134>
12. Hamouda, Y. E. M. (2024). Optimally Sensors Nodes Selection for Adaptive Heterogeneous Precision Agriculture using Wireless Sensor Networks based on Genetic Algorithm and Extended Kalman Filter. *Physical Communication*, 10279–102290. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2024.102290>
13. Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A Systematic Review of Optimization Algorithms for Structural Health Monitoring and Optimal Sensor Placement. *Sensors*, 23(6), 3280–3293. <https://doi.org/10.3390/s23063293>
14. Honcharenko, D. V., Mokin, V. B., & Protsenko, D. P. (2023). Building an information system for monitoring physical indicators based on the Internet of Things technology. *Information technology and computer engineering*, 57(2), 99–108. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-57-2-99-108>
15. Honcharenko, D., Mokin, V., Protsenko, D., Goraichev, G., & Varchyk, I. (2024). IoT system for measuring water status parameters based on Sigfox. *Materials of the LIII Scientific and Technical Conference of VNTU*. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2024/paper/view/20077>
16. IQAir – Air quality in the world. (n.d.). URL: <https://www.iqair.com/world-air-quality>
17. Kalogirou, S. (2002). Expert systems and GIS: an application of land suitability evaluation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(2-3), 89–112. [https://doi.org/10.1016/s0198-9715\(01\)00031-x](https://doi.org/10.1016/s0198-9715(01)00031-x)
18. Kim, Y. H. (2024). Greedy selection of sensors with measurements under correlated noise. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2024(1), 28–35. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01127-1>
19. Lancheros-Cuesta, D., & Felipe-Vallejo, D. (2023). Interconnection of wireless sensors for IoT systems. In: *2023 18th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*. <https://doi.org/10.23919/cisti58278.2023.10211838>
20. Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
21. Lee, S.-y., Lee, I.-b., Yeo, U.-h., Kim, R.-w., & Kim, J.-g. (2019). Optimal sensor placement for monitoring and controlling greenhouse internal environments. *Biosystems Engineering*, 188, 190–206. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.005>
22. Malik, M., Kothari, A., & Pandhare, R. (2024). Scalability Analysis of LoRa and Sigfox in Congested Environment and Calculation of Optimum Number of Nodes. *Sensors*, 24(20), 6660–6673. <https://doi.org/10.3390/s24206673>
23. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>
24. Mendes, W. R., Araújo, F. M. U., Dutta, R., & Heeren, D. M. (2019). Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Systems with Applications*, 124, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.043>
25. Miah, S. J., & Genemo, H. (2016). A Design Science Research Methodology for Expert Systems Development. *Australasian Journal of Information Systems*, 20, 68–95. <https://doi.org/10.3127/ajis.v20i0.1329>
26. Mutanu, L., Gupta, K., & Gohil, J. (2022). Leveraging IoT solutions for enhanced health information exchange. *Technology in Society*, 68, 101465–101882. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101882>
27. Odu, G. O. (2013). Review of Multi-criteria Optimization Methods – Theory and Applications. *IOSR Journal of Engineering*, 3(10), 01–14. <https://doi.org/10.9790/3021-031020114>
28. OneSoil. Free Farming App for Precision Agriculture. OneSoil. Free Farming App for Precision Agriculture. URL: <https://sistema.OneSoil.ai/ua>
29. Osman, D. N., & Abbas, E. (2022). Performance Evaluation of LoRa and Sigfox LPWAN Technologies for IoT. *Academic Journal of Research and Scientific Publishing*, 4(38), 05–24. <https://doi.org/10.52132/ajrsp.e.2022.38.1>
30. Protsenko, D., Tsvigun, S., & Honcharenko, D. (2023). An information system for analyzing the coverage area of the Sigfox Internet of Things station for determining sensor locations is proposed. *Materials of the 11th Scientific and Technical Conference of VNTU*, 1–3. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa2023/paper/view/18937>
31. Rak, M., Salzillo, G., & Granata, D. (2022). ESsecA: An automated expert system for threat modelling and penetration testing for IoT ecosystems. *Computers and Electrical Engineering*, 99, 107710–107721. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.107721>
32. Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873. <https://doi.org/10.1109/comst.2017.2652320>
33. Rothstein, A., Mokin, B., & Mityushkin, Y. (2001). Soft Computing: Pattern Identification with Fuzzy Knowledge Bases. *UNIVERSUM-Vinnitsia*. URL: https://www.researchgate.net/publication/301613133_Soft_Computing_identifikacia_zakonomenostej_necetkimi_bazami_znani_j
34. Safari Bazargani, J., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S.-M. (2021). A Survey of GIS and IoT Integration: Applications and Architecture. *Applied Sciences*, 11(21), 10353–10365. <https://doi.org/10.3390/app112110365>
35. Santamaria, A. F., Raimondo, P., De Rango, F., & Serianni, A. (2016). A two stages fuzzy logic approach for Internet of Things (IoT) wearable devices. *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, Spain*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/pimrc.2016.7794563>
36. Sharma, R. P., Ramesh, D., Pal, P., Tripathi, S., & Kumar, C. (2021). IoT enabled IEEE 802.15.4 WSN monitoring infrastructure driven Fuzzy-logic based Crop pest prediction. *IEEE Internet of Things Journal*, 1, 36–48. <https://doi.org/10.1109/ijot.2021.3094198>
37. Sneha, V., & Nagarajan, M. (2020). Localization in Wireless Sensor Networks: A Review. *Cybernetics and Information Technologies*, 20(4), 3–26. <https://doi.org/10.2478/cait-2020-0044>
38. Tayyaba, S., Ashraf, M. W., Alquthami, T., Ahmad, Z., & Manzoor, S. (2020). Fuzzy-Based Approach Using IoT Devices for Smart Home to Assist Blind People for Navigation. *Sensors*, 20(13), 3658–3674. <https://doi.org/10.3390/s20133674>
39. Thomopoulos, V., Tolis, F., Blounas, T.-F., Tsiapanitis, D., & Kavga, A. (2024). Application of Fuzzy logic and IoT in a small-scale Smart Greenhouse System. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100425–100446. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100446>
40. Kaur, D. A., & Kaur, K. (2009). Fuzzy Expert Systems Based on Membership Functions and Fuzzy Rules. *International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, Shanghai, China, 2009, pp. 513–517. <https://doi.org/10.1109/AICI.2009.382>

FUZZY EXPERT SYSTEM FOR FINDING OPTIMAL LOCATIONS FOR SENSOR DEPLOYMENT FOR IOT IN FOREST MONITORING

The approach to developing a fuzzy expert system for determining the optimal locations for sensor deployment in energy-efficient IoT solutions based on Sigfox technology is presented in the paper. Particular attention is given to the use of geoinformation technologies (GIS) and satellite imagery for analyzing spatial and technogenic factors influencing the placement of the sensor network. We propose a system that considers a wide range of environmental parameters, including air pollution levels, industrial emission concentrations, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), temperature anomalies, and proximity to potential sources of pollution such as industrial facilities, transportation corridors, and agricultural lands. The core of the expert system is a fuzzy knowledge base that models the relationships between technogenic and natural factors, determining the feasibility of sensor deployment in specific locations. The decision-making algorithm is based on fuzzy sets and multi-criteria analysis, enabling the consideration of both the technical characteristics of the sensors and the environmental conditions in which they will operate. This ensures increased flexibility and adaptability of the system, even under significant uncertainty. An approach has been developed to automate the process of selecting sensor installation points, optimizing deployment and maintenance costs for the IoT network. The expert system has been applied to a forest monitoring information system, where high-risk pollution zones were identified, and optimal sensor placement was determined based on multiple criteria. The study found that integrating fuzzy logic and GIS significantly enhances the effectiveness of environmental monitoring by providing more accurate identification of ecologically vulnerable areas and minimizing the number of required sensors without compromising monitoring quality. The proposed approach can be adapted to other fields, including the agro-industrial sector, urban environmental studies, and water resource monitoring. Thus, the use of such an expert system can contribute to reducing operational costs, improving the reliability of IoT infrastructure, and enhancing the environmental situation in regions with high technogenic loads.

Keywords: Internet of Things; knowledge base; fuzzy logic; sensors; geospatial technologies; evaluation algorithms; sensor network.