



Наукові перспективи
Видавнича група

№ 10(51)

2025

НАУКА і ТЕХНІКА

серія: право, серія: економіка, серія: педагогіка,
серія: техніка, серія: фізико-математичні науки

СЬОГОДНІ

З Україною

в серці!



Видавнича група «Наукові перспективи»

Всеукраїнська Асамблея докторів наук із державного управління

«Наука і техніка сьогодні»

*(Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка»,
Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»)*

Випуск № 10(51) 2025

Київ – 2025

Publishing Group «Scientific Perspectives»

Ukrainian Assembly of Doctors of Sciences in Public Administration

"Science and technology today"

***("Pedagogy" series, "Law" series, "Economics" series,
"Physical and mathematical sciences" series, "Technics" series)***

Issue № 10(51) 2025

Kyiv – 2025

**«Наука і техніка сьогодні» (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка»,
Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»): журнал. 2025.
№ 10(51) 2025. С. 2165**



*Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 07.04.2022 № 320
журналу присвоєно категорію "Б" із економіки та педагогіки
(спеціальності – 015 - Педагогічні науки; 076 - Економічні науки)*

*Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 06.06.2022 № 530 журналу
присвоєно категорію "Б" із права (спеціальність – 081 Юридичні науки)*

*Згідно наказу Міністерства освіти і науки України від 10.10.2022 № 894 журналу присвоєно
категорію "Б" із техніки (спеціальність - 122 Комп'ютерні науки)*

*Журнал видається за підтримки Міждержавної гільдії інженерів консультантів, Інституту філософії та
соціології Національної Академії Наук Азербайджану (Баку, Азербайджан), громадської організації «Християнська
академія педагогічних наук України» та громадської організації «Всеукраїнська асоціація педагогів і психологів з
духовно-морального виховання»*

*Рекомендовано до друку Президією Всеукраїнської Асамблеї докторів наук з державного управління
(Рішення від 24.10.2025 № 9/10-25).*



Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index
Copernicus (IC), міжнародної пошукової системи Google Scholar та до
міжнародної наукометричної бази даних Research Bible



Головний редактор: Сопілко Ірина Миколаївна - доктор юридичних наук,
професор, Відмінник освіти України, Лауреат Премії Президента України для молодих
вчених, Лауреат Премії Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим в
галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок,
академік Академії наук вищої школи України, Заслужений юрист України (Київ, Україна)

Редакційна колегія:

- Бахов Іван Степанович — доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри іноземної філології та перекладу Міжрегіональної академії управління персоналом (Київ, Україна)
- Будник Вікторія Анатоліївна - кандидат економічних наук, професор, професор кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій Державного університету інфраструктури та технологій (Київ, Україна)
- Войтасик Андрій Миколайович – кандидат технічних наук за спеціальністю системи та процеси керування, доцент кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв, Україна), Віце-академік громадської наукової організації «Академія технічних наук України» (Івано-Франківськ, Україна)
- Волк Павло Павлович — доцент кафедри водної інженерії та водних технологій Національного університету водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)
- Воробйов Яків Анатолійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математики, інформатики та інформаційної діяльності Ізмайльського державного гуманітарного університету, учасник бойових дій, член громадської організації «Міжнародна фундація науковців та освітян», автор наукових публікацій та навчально-методичних матеріалів у галузі математики, прикладної математики, інформаційних технологій та педагогіки;
- Гирка Ольга Ігорівна - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри товарознавства, митної справи та управління якістю Львівського торговельно-економічного університету (Львів, Україна)
- Гнатюк Сергій Олександрович - кандидат технічних наук, доцент, заступник декана факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету (Київ, Україна)
- Дівізніюк Михайло Михайлович - доктор фізико-математичних наук, професор, Завідувач відділу Відділу цивільного захисту та інноваційної діяльності Державної установи "Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України" (Київ, Україна)
- Дяденчук Альона Федорівна - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри вищої математики і фізики Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (Мелітополь, Україна)
- Забулонов Юрій Леонідович - доктор технічних наук, професор, Член-кореспондент НАН України, директор Державної установи «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України» (Київ, Україна)
- Льбін Валерій Юрійович - доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

- | | |
|---|-------------|
| Нестеренко С.А., Наумов О.Д.
<i>АНАЛІЗ ПРОПУСКНОЇ ЗОРОЗУ МОЖЛИВОСТІ МАГІСТРАЛІ
MODBUS TCP НА ОСНОВІ БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛІВ
СТАНДАРТУ IEEE 802.11.</i> | 1829 |
| Ніконоров А.О., Поперешняк С.В.
<i>ФУНКЦІОНАЛЬНІ АЛГЕБРИ ПОЛІТИК ТА РЕАКТИВНІ МОДЕЛІ
ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ТЕЛЕМЕТРІЇ В МЕРЕЖАХ З ОБМЕЖЕНИМИ
РЕСУРСАМИ</i> | 1844 |
| Пацьора А.А.
<i>ІЄРАРХІЧНИЙ МЕТОД АДАПТАЦІЇ ОСВІТНЬОГО СЕРЕДО-
ВИЩА НА ОСНОВІ СЕМАНТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ WEB 3.0</i> | 1861 |
| Підбурачинський Р.А., Думин І.Б.
<i>АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПОШУК БІЗНЕС-СУТНОСТІ НА ОСНОВІ
ГОЛОСОВОГО ВВЕДЕННЯ УКРАЇНСЬКОЮ МОВОЮ</i> | 1872 |
| Плехова Г.А.
<i>ФОРМУВАННЯ СКЛАДУ ІНФОКОМУНІКАЦІОННОЇ МЕРЕ-
ЖЕВОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОНЕНТНОГО
ПІДХОДУ</i> | 1886 |
| Поворознюк О.О., Ахмаметьєва Г.В.
<i>АНАЛІЗ ХМАРНИХ СЕРВІСІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗПЕЧНОЇ
ОБРОБКИ МУЛЬТИМЕДІЙНОГО КОНТЕНТУ</i> | 1899 |
| Рихва В.І., Солодовник Г.В.
<i>АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ
ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ МЕРЕЖЕВОГО ТРАФІКУ</i> | 1912 |
| Романюк Л.А., Чихіра І.В., Тулайдан Галина М., Головка А.Д.
<i>МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РОЗШИРЕННЯ
ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ НА ОПТИМІЗАЦІЮ ЕФЕКТИВНОСТІ
ДОСТАВКИ «ОСТАННЬОГО КІЛОМЕТРА» В МІСЬКИХ
ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ</i> | 1923 |

УДК 004.8:656.222.3

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-10\(51\)-1923-1936](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-10(51)-1923-1936)

Романюк Леонід Антонович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, <https://orcid.org/0000-0002-2538-4026>

Чихіра Ігор Вікторович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, <https://orcid.org/0000-0002-8615-3635>

Тулайдан Галина Миколаївна кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та методики її навчання, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, м. Тернопіль, <https://orcid.org/0000-0003-2306-6435>

Головко Андрій Дмитрович аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, <https://orcid.org/0009-0004-3178-0879>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РОЗШИРЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ НА ОПТИМІЗАЦІЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОСТАВКИ «ОСТАННЬОГО КІЛОМЕТРА» В МІСЬКИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. У цьому дослідженні представлено структуру для автоматизації польотних процесів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з основним фокусом на точному плануванні траєкторії для забезпечення ефективної взаємодії з навколишнім середовищем. Запропонована система включає в себе тривимірну модель руху, яка динамічно коригує траєкторії на основі факторів навколишнього середовища, підвищуючи адаптивність БПЛА до мінливих умов.

У структурі було використано систему нечіткого висновку, для усунення невизначеностей, спричинених шумом датчиків, зовнішніми перешкодами та обмеженнями керування. Цей підхід обробляє неточні входні дані, такі як помилки позиції та швидкості, використовуючи лінгвістичні змінні та прийняття рішень на основі правил. Перетворюючи точні входні дані в нечіткі набори та застосовуючи експертні правила, система ефективно пом'якшує

нелінійність і дестабілізуючі впливи, забезпечуючи надійні стратегії керування операціями БПЛА.

У структуру також було інтегровано нейронні мережі довгої короткочасної пам'яті (long short-term Memory – LSTM) для прогнозування майбутніх змін навколишнього середовища та дестабілізуючих факторів.

Використовуючи історичні дані, архітектура LSTM моделює довгострокові тимчасові залежності, уможливлуючи проактивне коригування траєкторії. Ця здатність прогнозування є критично важливою для підтримки стабільності та точності в динамічних середовищах.

Щоб підвищити екологічну обізнаність у реальному часі, у систему було включено технологію радіочастотної ідентифікації (RFID). Активні та пасивні RFID-мітки надають дані про контекстну локалізацію, підтримують уникнення перешкод і оптимізацію траєкторії. Поєднуючи локалізацію на основі RFID з фільтром

Калмана, система забезпечує точне просторове визначення та рекурсивне прийняття рішень, зменшуючи помилки передбачення та покращуючи точність навігації.

Експериментальна перевірка була проведена за допомогою БПЛА DJI Matrice 210, оснащеного вдосконаленими датчиками та вбудованим обчислювальним модулем NVIDIA Jetson TX2. Безпілотний літальний апарат успішно долав середовище з чисельними перешкодами, позначене мітками RFID, за різних умов вітру.

Система продемонструвала високу точність відстеження траєкторії, зберігаючи середньоквадратичну похибку 0,22 метра, безпечну дистанцію проходження перешкоди 2,8 метра та швидкий час реакції 0,5 секунди для початку превентивних маневрів.

Ця комплексна структура поєднує в собі нечітку логіку, нейронні мережі та локалізацію на основі RFID для створення надійної архітектури керування БПЛА. Незважаючи на такі проблеми, як високі обчислювальні вимоги та залежність від інфраструктури RFID, дослідження підкреслює значні досягнення в автоматизації БПЛА. Майбутні дослідження спрямовані на покращення координації кількох БПЛА та оптимізацію операцій за допомогою покращеної інтеграції апаратного забезпечення та методів паралельної обробки даних.

Ключові слова: адаптивне управління, динаміка середовища, пом'якшення невизначеності, послідовне прогнозування, автономна навігація, обробка в реальному часі.

Romaniuk Leonid Antonovych Ph. D. in Technical Sciences, Docent, Department of Higher Mathematics, Ternopil National Technical University, Ternopil, <https://orcid.org/0000-0002-2538-4026>

Chykhira Ihor Viktorovich Ph. D. in Technical Sciences, Docent, Department of Computer-Integrated Technologies, Ternopil National Technical University, Ternopil, <https://orcid.org/0000-0002-8615-3635>

Tulaidan Halyna Mykolaivna Ph. D. in Chemical Sciences, Docent, Department of Chemistry and Methods of Its Teaching, Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ternopil, <https://orcid.org/0000-0003-2306-6435>

Holovko Andriy Dmytrovych Postgraduate, Department of Computer-Integrated Technologies, Ternopil National Technical University, Ternopil, <https://orcid.org/0009-0004-3178-0879>

MATHEMATICAL MODELING OF TRANSPORT NETWORK EXPANSION IMPACT ON THE OPTIMIZATION OF LAST-KILOMETER DELIVERY EFFICIENCY IN URBAN LOGISTICS SYSTEMS

Abstract. This study presents an advanced framework for automating the flight processes of unmanned aerial vehicles (UAVs), with a primary focus on precise trajectory planning to ensure effective interaction with the environment. The proposed system incorporates a three-dimensional motion model that dynamically adjusts trajectories based on environmental factors such as wind, enhancing UAV adaptability to changing conditions.

To address uncertainties caused by sensor noise, external disturbances, and control limitations, the framework employs a fuzzy inference system. This approach processes imprecise input data, such as positional and velocity errors, using linguistic variables and rule-based decision-making. By converting precise inputs into fuzzy sets and applying expert-defined rules, the system effectively mitigates nonlinearities and destabilizing influences, providing robust control strategies for UAV operations.

The framework also integrates Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks to predict future environmental changes and destabilizing factors. Leveraging historical data, the LSTM architecture models long-term temporal dependencies, enabling proactive trajectory adjustments. This predictive capability is critical for maintaining stability and accuracy in dynamic environments.

To enhance real-time environmental awareness, the system incorporates Radio Frequency Identification (RFID) technology. Active and passive RFID tags provide contextual localization data, supporting obstacle avoidance and trajectory optimization.

By combining RFID-based localization with a Kalman filter, the system achieves precise spatial awareness and recursive decision-making, reducing prediction errors and improving navigation accuracy.

Experimental validation was conducted using a DJI Matrice 210 UAV equipped with advanced sensors and an onboard NVIDIA Jetson TX2 computing module. The UAV successfully navigated obstacle-rich environments marked with RFID tags under varying wind conditions. The system demonstrated high trajectory tracking precision, maintaining a root mean square error of 0.22 meters, a safe obstacle clearance distance of 2.8 meters, and a rapid response time of 0.5 seconds for initiating preventive maneuvers.

This comprehensive framework combines fuzzy logic, neural networks, and RFID-based localization to create a robust UAV control architecture. Despite challenges such as high computational requirements and reliance on RFID infrastructure, the study highlights significant advancements in UAV automation. Future research aims to enhance multi-UAV coordination and optimize operations through improved hardware integration and parallel data processing techniques.

Keywords: adaptive control, environmental dynamics, uncertainty mitigation, sequential prediction, autonomous navigation, real-time processing.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток індустрії безпілотних літальних апаратів здійснив значний вплив на різні галузі сучасної діяльності, як у випадку з логістикою, агрокультурою та моніторингом навколишнього середовища. Тим не менш, враховуючи сталу тенденцію до більшої вимогливості щодо характеру здійснення безпілотних літальних операцій, постає нагальна потреба до більшої автоматизації процесів обробки невизначеностей, які насамперед пов'язуються із навколишніми умовами, у програмно-сенсорних системах таких апаратів.

Застосування традиційних методів, які наприклад опосередковані використанням пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів, наземних станцій управління тощо, пов'язане з менш ефективним доданням зазначених обмежень.

Таким чином, базою для поточного дослідження було визначено використання технологій радіочастотної ідентифікації, довгої короткочасної пам'яті та нечіткого висновку. Така комбінація є теоретично спроможною здійснювати обробку параметрів нелінійної динаміки та ситуаційних невизначеностей, які завжди супроводжують політ БПЛА в мовах навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науково-дослідницькому просторі сьогодення з'являються роботи, присвячені розробці методології, направленої на автоматизації процесу побудови траєкторії та орієнтації БПЛА.

З. Чжу, Хе Дж., Л. Хоу, Л. Сюй, В. Чжу, Л. Ван [1] було розглянуто проблему екстреної локалізації для динамічних наземних користувачів у сценаріях пошуку та порятунку, коли є GPS недоступним.

Запропоноване рішення фокусується на адаптивному плануванні траєкторії БПЛА з використанням стратегії без зависання та оцінки максимальної ймовірності (Maximum Likelihood Estimation – MLE) для ефективної та точної локалізації мобільних користувачів. Дослідження представляє двоетапний підхід, який включає початкове сканування для отримання приблизних даних про місцезнаходження та фазу точної локалізації для уточнення планування траєкторії БПЛА.

На початковому етапі сканування зона катастрофи ділиться на комірки, а БПЛА покривають ці зони для збору даних індикатора рівня отриманого сигналу (Received Signal Strength Indicator – RSSI). MLE використовується для оцінки розташування та швидкості захоплених осіб, враховуючи їхню мобільність для визначення верхньої межі похибки локалізації. Ця фаза дозволяє БПЛА ефективно звузити потенційні місця розташування користувачів, мінімізуючи витрати на обчислення [1].

Фаза точної локалізації об'єднує алгоритм розширеної оптимізації роїв частинок (Enhanced Particle Swarm Optimization – EPSO) у поєднанні зі стратегією доступу до країв для оптимізації планування траєкторії. EPSO долає традиційні обмеження алгоритму, покращуючи швидкість конвергенції та уникаючи локальних оптимумів. Цей підхід скорочує загальний час виконання завдання та підтримує високу точність локалізації шляхом динамічного коригування траєкторій БПЛА на основі рухів користувача.

Моделювання підтверджує ефективність запропонованого методу в сценарії катастроф із змодельованою зоною 1120 м × 640 м і кількома БПЛА. Результати демонструють скорочення часу виконання завдання локалізації на 28,7% порівняно з базовими методами, а також покращену точність локалізації. Запропонована структура MLE-EPSO ефективно поєднує складність завдань, обчислювальну ефективність і точність локалізації, що робить її надійним рішенням для надзвичайних ситуацій [1].

У роботі З. Ма, Дж. Чень [2] представлено особливості планування траєкторії БПЛА шляхом використання дискретної глобальної сітки (Discrete Global Grid System – DGGS) для підвищення ефективності виявлення конфліктів. Центральним у цьому підході є розробка багатомасштабної дискретно-шарової сітки (Multi-Scale Discrete Layered Grid – MS-DLG), яка вдосконалює управління сіткою через вертикальну та горизонтальну інтеграцію структур сітки. Ця модель значно зменшує обчислювальну складність за рахунок консолідації шарів сітки та оптимізації представлення обмежень повітряного простору.

Грунтуючись на основі моделі MS-DLG, адаптивний метод планування траєкторії використовує PSO і містить низку вдосконалень, адаптованих до конкретних вимог БПЛА. Ці вдосконалення включають динамічне коригування

розмірів частинок під час оптимізації, уточнені стратегії ініціалізації на основі характеристик траєкторії БПЛА та диференційовані механізми оновлення положення, які класифікують частинки за категоріями для оптимізації коригування їх траєкторії. Ці модифікації разом підвищують ефективність і точність планування траєкторії БПЛА, дозволяючи ідентифікувати оптимальні маршрути, які збалансовують довжину траєкторії, безпеку та дотримання правил повітряного простору [2].

Ефективність методу була ретельно підтверджена шляхом моделювання, проведеного в різноманітних і складних сценаріях повітряного простору, включаючи реальні дані та різні рівні складності навколишнього середовища. Результати показують, що адаптивний метод планування шляху перевершує традиційні та модифіковані алгоритми PSO за ключовими показниками, такими як оптимальність рішення, показники успіху та ефективність обчислень. Крім того, модель MS-DLG демонструє значне покращення швидкості виявлення конфліктів порівняно з існуючими системами керування мережею, що підкреслює її корисність у великомасштабних середовищах повітряного простору [2].

Крім того, варто зазначити праці наступних науковців: В. Лю, З. Чжен, К. Цай [3], Л. Ван, Дж. Чжан, Дж. Чуань, Р. Ма, А. Фей [4], Х. Ву, Дж. Чень, В. Сюй, Н. Чен, В. Ши, Л. Ван, Х. Шень [5], Х. Ву, Ф. Лю, С. Чжоу, Дж. Чень, Л. Ван, Х. Шень [6], Г. Хань, Х. Ян, Л. Лю, В. Чжан, М. Гуйцзані [7] та інших.

Незважаючи на наявність вагомих наукових напрацювань у цій сфері, проблема автоматизації побудови траєкторії руху та орієнтації БПЛА не має вичерпного наукового розв'язання. Вона потребує подальшого поглибленого дослідження та розроблення ефективних методів її реалізації.

Метою статті є розробка комбінованої архітектури автоматизації польоту БПЛА шляхом використання RFID-маркерів, LSTM мережі та моделі нечіткого висновку

Виклад основного матеріалу. Основоположним напрямком в автоматизації літальних процесів БПЛА, насамперед, є забезпечення точного планування траєкторії, оскільки від цього залежить характер взаємодії БПЛА з навколишнім середовищем. Система рухів БПЛА може бути змодельована із застосуванням розширеної алгоритмічної бази, яка враховуватиме параметри тривимірного простору та фактори навколишнього середовища, які проявляються, наприклад, у вигляді вітру. Позиційний вектор $x(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$ з врахуванням проміжку часу t описується таким чином:

$$\dot{x}(t) = V(t)\cos(\chi(t))\cos(\gamma(t)) + V_{W_x}(t) \quad (1)$$

$$\dot{y}(t) = V(t)\sin(\chi(t))\cos(\gamma(t)) + V_{W_y}(t) \quad (2)$$

$$\dot{z}(t) = V(t)\sin(\gamma(t)) + V_{W_z}(t) \quad (3)$$

$$\dot{\chi}(t) = \frac{g}{V(t)} \tan(\varphi(t)) \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}(t) = u_{\gamma}(t) \quad (5)$$

де $V(t)$ відповідає швидкості польоту БПЛА, $\chi(t)$ – кут направлення апарату (азимут), $\gamma(t)$ – кут траєкторії польоту (тангаж), $V_{W_x}(t)$, $V_{W_y}(t)$, $V_{W_z}(t)$ відповідають швидкостям вітру у відповідності до супровідних осей. Врахування та впровадження у систему параметрів вітру дозволяє БПЛА динамічно підлаштовувати свою траєкторію у відповідь до мінливих погодних умов. Тим не менш, беручи до уваги той факт, що БПЛА часто використовуються в умовах невизначеностей, які спричиняються шумом датчиків, приводовими обмеженнями та зовнішніми дестабілізуючими факторами, постає необхідність у використанні адаптивних технологій машинного навчання, у даному випадку – нечіткого висновку. Системи нечіткого висновку спроможні нівелювати негативні впливи описаних факторів, застосовуючи лінгвістичні змінні та концепцію нечіткої логіки задля моделювання стратегій керування апаратом. Тобто суть полягає в обробці неточних вхідних даних та нелінійної системної динаміки.

Розробка такої системи керування передбачає перетворення чітких вихідних змінних у нечіткі набори за посередництвом процесу під назвою фазифікація (fuzzification – знеточнення). Задля демонстрації, прикладами таких чітких змінних можуть бути позиційна помилка e_p та швидкісна помилка e_v . Функції належності визначають спосіб того, як кожна точка у вхідному просторі зіставляється до ступеня належності від 0 до 1, застосовуючи маркери: «негативний великий (НВ)», «нуль (0)» та «позитивний великий (ПВ)».

База правил встановлюється з використанням експертних знань з метою визначення результируючих дій. Правило може виражатися у вигляді умови: «ЯКЩО e_p та e_v присвоєно НВ, ТОДІ результируючому виходу u присвоюється ПВ.». Архітектура нечіткого висновку застосовує такі правила з метою обчислення нечітких вихідних даних, спираючись на ступені належності вхідних даних. Процедура дефазифікації перетворює нечіткі вихідні дані зворотно у чіткі вхідні дані під впливом центроїдного обчислення.

З точки зору математичної репрезентації, результируючий вихід обчислюється у вигляді наступного рівняння:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \mu_i(e_p) \cdot \mu_j(e_v) \cdot u_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \mu_i(e_p) \cdot \mu_j(e_v)} \quad (6)$$

де N та M чисельно позначають нечіткі набори даних для позиційної та швидкісної помилок, $\mu_i(e_p)$ та $\mu_j(e_v)$ відповідають функціям належності, u_{ij} – результируючий вихід, асоційований із нечіткими наборами даних i та j .

Адаптивне керування з автоматичним побудуванням траєкторії не має в змозі бути реалізованими без інтеграції системи предиктивного контролю. В контексті поточного дослідження дану роль виконує концепція нейронних мереж на основі LSTM провідною суттю яких є моделювання довгострокових часових залежностей у секвенційних даних, що є необхідним для передбачення майбутніх умов та дестабілізуючих факторів.

Мережа LSTM складається з блоків пам'яті, які зберігають інформацію протягом порівняно великих проміжків часу. Кожен блок містить ворота (гейти), основною задачею яких є регуляція потоків інформації:

$$f_t = \sigma(W_f [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (7)$$

$$i_t = \sigma(W_i [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (8)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_c [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (9)$$

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \quad (10)$$

$$o_t = \sigma(W_o [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (11)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t) \quad (12)$$

де x_t відповідає вхідному вектору з урахуванням часу t , σ – сигмоїдна активаційна функція, $\tanh$ – гіперболічна тангенсоїдна функція, $\odot$ позначає поелементну мультиплікацію, W та b – вагові матриці та вектори зміщення, відповідно.

Впровадження секвенційних сенсорних даних та історичних дій, спрямованих на керування БПЛА у мережу LSTM дає змогу літальному апаратові передбачувати усі можливі зміни у навколишньому середовищі, враховуючи процедуру тренування цієї мережі мінімізацією функції втрат, що засновується на імплементації середньої квадратичної помилки (Mean Squared Error – MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|Y_t - \hat{Y}_t\|^2 \quad (13)$$

де N являє собою число часових кроків, Y_t – саме цільовий вихід та $\hat{Y}_t$ – передбачуваний вихід.

Задля оптимізованої реєстрації вхідних даних, з подальшою їх точною обробкою у реальному часі, у систему інтегруються маркери RFID (Radio-frequency identification – радіочастотна ідентифікація) з їх розподіленням на активне та пасивне живлення. Загалом, дана технологія уможливорює взаємодію БПЛА з його оточенням завдяки зчитуванню інформації з маркерів, розташованих у певних умовах на складових частинах оточуючого ландшафту, та що живляться електромагнітним полем, яке опосередковане впливом

зчитувача, як у випадку з пасивним застосуванням, так і тих, що мають власне джерело живлення, як у випадку з активним.

Живлення P_r , яке забезпечує RFID-зчитувач з маркера моделюється за посередництвом формули передачі Фрііса:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \eta \quad (13)$$

де P_t позначає передаване живлення, G_t, G_r відповідають виграшу від передавальних та рецепторних антен відповідно, λ позначає довжину хвилі, R – дистанція між зчитувачем та маркером, η – ефективність передачі живлення маркера.

Вимірюючи даний параметр, БПЛА може оцінювати дистанцію до маркера, що в свою чергу сприяє покращеній локалізаційній обізнаності. Локалізація, опосередкована RFID, може бути досягнута завдяки підходу на базі індикатору рівня отриманого сигналу (Received Signal Strength Indicator – RSSI):

$$R = R_0 \times 10^{\frac{(P_0 - P_r)}{10n}} \quad (14)$$

де R_0 відповідає початковій відстані P_0 – отриманий рівень живлення при початковій відстані n є показник втрат, отриманий під час руху БПЛА.

Процедура фільтрації Калмана продемонструвала потенціал щодо з'єднання вхідних даних, отриманих в процесі зчитування інформації з RFID маркерів з вище згаданими типами вхідних даних, в результаті підвищуючи просторову оцінку та підсумкове прийняття рішень. Воно забезпечує рекурсивну оцінку шляхом мінімізації середнього значення помилок MSE.

Дана операція здійснюється завдяки передбачуванню стану у кожен часовий крок та подальшому його оновленню як у моделі так і у вимірюваннях. Становий вектор БПЛА x_k на кожен часовий крок k включає змінні позиції, швидкості та орієнтації:

$$x_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \\ \dot{z}_k \\ \theta_k \\ \phi_k \\ \psi_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

із врахуванням даної матриці, стан апарату оновлюється згідно з динамічною моделлю:

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \quad (16)$$

де F_{k-1} вказує на матрицю зміни стану, вилучену з кінематичних рівнянь БПЛА, в той час як B_{k-1} відповідає матриці контрольного входу, u_{k-1} – вектор цього входу, який може виражатися у вигляді тяги двигуна та відхилень керуючої системи, і w_{k-1} – шум, що обробляється, гаусова властивість якого припускається із нульовим середнім значенням та коваріантністю Q_{k-1}

Сенсорні виміри інкорпуються через обсервативну модель:

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (16)$$

де z_k визначає вимірювальний вектор на часовий крок, H_k – обсервативна матриця, яка відображає станові змінні у вимірюваннях сенсорів та маркерів.

Як вже було зазначено, фільтр Калмана працює рекурсивним чином із розподілом на два кроки, перший з яких полягає у передбаченні за посередництвом оцінювання поточного стану, спираючись на минулі стани та динаміку системи:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_{k-1}\hat{x}_{k|k-1} + B_{k-1}u_{k-1} \quad (17)$$

$$P_{k|k-1} = F_{k-1}P_{k-1|k-1}F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (18)$$

де $\hat{x}_{k|k-1}$ представляє оцінку передбачуваного стану та $P_{k|k-1}$ – коваріантна матриця передбачуваного стану, яка відображає неточність передбачення.

Другий крок полягає у оновленні шляхом уточнення проведеного передбачення, за допомогою використання нових сенсорних вимірювань:

$$y_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (19)$$

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (20)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (21)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k y_k \quad (22)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (23)$$

де u_k відіграє роль іновативної різниці, або результативної помилки, яка репрезентує різницю між спостережуваними та передбачуваними вимірюваннями, S_k – іновативна коваріантність, K_k – матриця виграшу Калмана,

присвоєна вимірюванням, та I – ідентифікаційна матриця. Таким чином, кінематична алгоритмічна база БПЛА доповнюється позиційними RFID-залежними коректуваннями $\Delta_{x_{RFID}}$, $\Delta_{y_{RFID}}$, $\Delta_{z_{RFID}}$.

В кінцевому випадку, після фіксації основних ланок запропонованої моделі, необхідно здійснити її узагальнення, що зображене на рисунку 1.

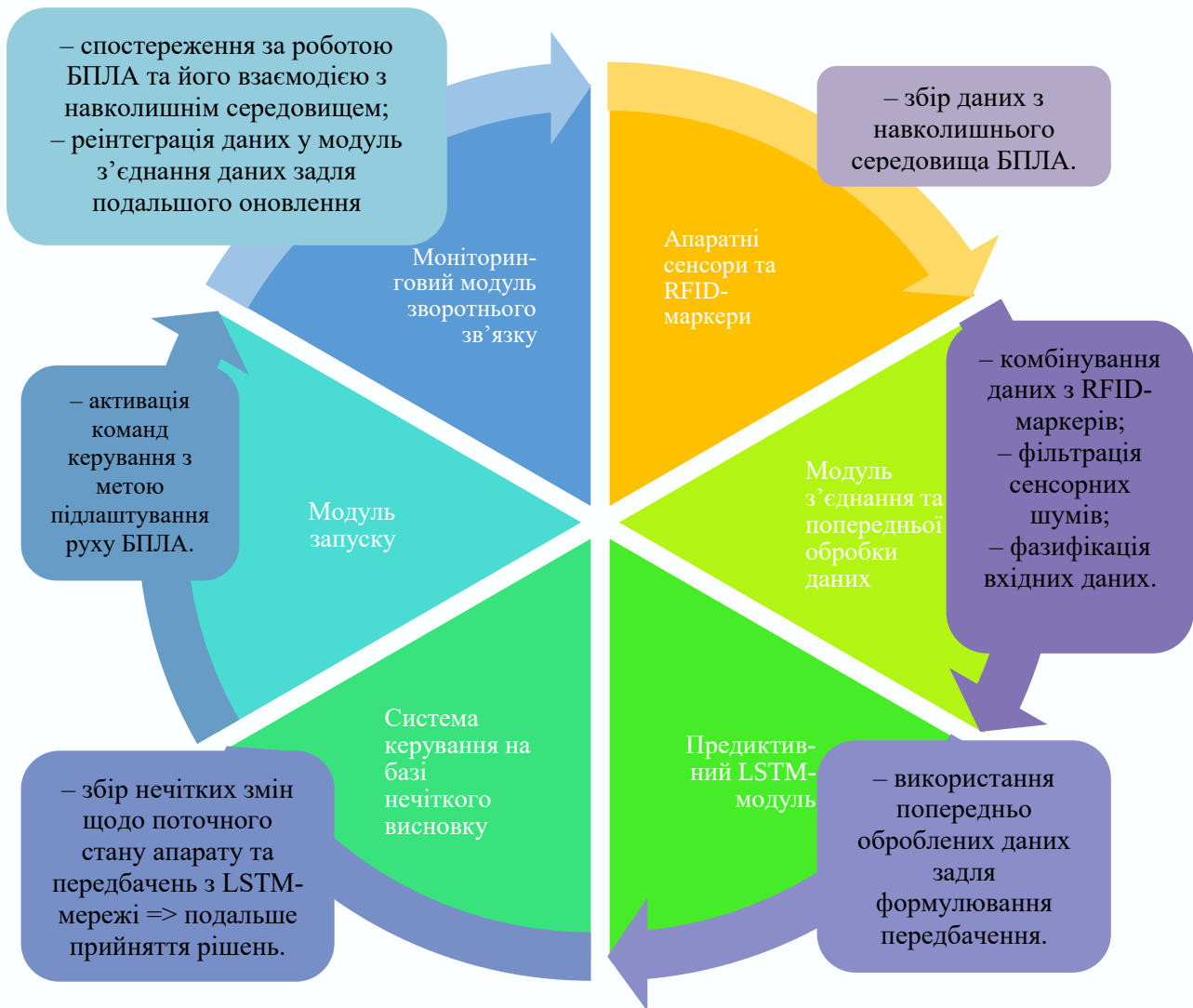


Рис. 1. Архітектура запропонованої моделі автоматизації польоту БПЛА

Симуляція роботи БПЛА проводилася в умовах його навігації через середовище з наявними перешкодами, обладнаними RFID-маркерами та впливами, опосередкованими варіативністю вітру. Оцінка продуктивності автономного польоту БПЛА спиралася на характеристики відслідковування траєкторії, уникнення перешкод, адаптивності та обчислювальної навантаженості. Експериментальна установка включала квадрокоптерний БПЛА DJI Matrice 210, оснащений стандартними сенсорами: інерційний вимірювальний модуль,

GPS, камери та RFID-зчитувач. Бортовий комп'ютер мав у своєму складі графічний модуль NVIDIA Jetson TX2 із встановленим Ubuntu 18.04 LTS.

Результати оцінювання показали, що інтегрована апаратно-програмна архітектура сприяла підтримці високої точності будування та відслідковування траєкторії польоту. Середнє середньоквадратичне відхилення при цьому склало близько 0.22 метрів, що свідчить про вивірену навігацію. До того ж, БПЛА було витримано середню мінімальну роздільну відстань в районі 2.8 метрів та середній час відгуку склав 0.5 секунд, починаючи від розпізнавання та ініціації превентивних маневрів.

Висновки. Загалом, запропонована архітектура спирається комбіновану методологію, що створює синергійний ефект у відношенні автоматизації безпілотних літальних апаратів. Система нечіткого висновку спеціалізується на обробці нечітких дестабілізуючих ефектів та нелінійностей керування апаратом; LSTM мережа ставить за мету передбачення майбутніх дестабілізуючих ефектів, беручи за основу історичні дані. RFID-маркери забезпечують інтерактивну контекстну інформацію, покращуючи локалізаційну спроможність апарата підлаштовуватися до дестабілізаційних факторів та його обізнаність у навколишньому середовищі.

Попри усі виявлені переваги запропонованої методології, вона не позбавлена наочних недоліків, які насамперед проявляються у вигляді завищених обчислювальних ресурсів, які мають долатися дорожчим обладнанням у поєднанні з технікою паралельної обробки даних. Окрім того, залежність від RFID інфраструктури може накласти обмеження з локалізаційної точки зору та вимагати розгортання в спеціалізованих зонах.

Майбутнє дослідження фокусуватиметься на аналізі інтеграції RFID-маркерів у ключові деталі БПЛА задля унікальної ідентифікації індивідуального апарату в умовах одночасної роботи кількох БПЛА з метою уникнення потенційних зіткнень або їх координації в контексті виконання спільної задачі. Також таке вдосконалення може пропонувати покращену обчислювальну комунікацію, сприяти контрольованому процесу приземлення та зарядки і запобігати неавторизованому доступу.

Література:

1. Zhu Z., He J., Hou L., Xu L., Zhu W., Wang L. Emergency localization for mobile ground users: an adaptive UAV trajectory planning method. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024. 215 p.
2. Ma Z., Chen J. Adaptive path planning method for UAVs in complex environments. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. № 115. 2022. P. 103133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103133>
3. Liu W., Zheng Z., Cai K. Adaptive path planning for unmanned aerial vehicles based on bi-level programming and variable planning time interval. *Chinese Journal of Aeronautics*. № 26. 2013. P. 646–660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.04.041>

4. Wang L., Zhang J., Chuan J., Ma R., Fei A. Edge intelligence for mission cognitive wireless emergency networks. *IEEE Wireless Communications*. № 27(4). 2020. P. 103–109.
5. Wu H., Chen J., Xu W., Cheng N., Shi W., Wang L., Shen X. Delay-minimized edge caching in heterogeneous vehicular networks: a matching-based approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. № 19(10). 2020. P. 6409–6424.
6. Wu H., Lyu F., Zhou C., Chen J., Wang L., Shen X. Optimal UAV caching and trajectory in aerial-assisted vehicular networks: a learning-based approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. № 38(12). 2020. P. 2783–2797.
7. Han G., Yang X., Liu L., Zhang W., Guizani M. A disaster management-oriented path planning for mobile anchor node-based localization in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. № 8(1). 2020. P. 115–125.
8. Ebrahimi D., Sharafeddine S., Ho P.-H., et al. Autonomous UAV trajectory for localizing ground objects: a reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. Vol. 20(4). 2021. P. 1312–1324.
9. Wu J., Yuan W., Liu F., Cui Y., Meng X., Huang H. UAV-based target tracking: integrating sensing into communication signals. *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*. 2022. P. 309–313.
10. Yu X., Liu Z., Xu L., Wang L. Lifetime maximization for UAV-enabled integrated localization and communication networks in emergency scenarios. *14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. 2022. P. 905–909.
11. Zhu X., Wang Y., Xu L. Minimizing the maximum length of flight paths for UAVs providing location service to ground targets. *IEEE Int of T Journal*. №9(12).2022.P. 9904-9917.
12. Aggarwal S., Kumar N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: a review, solutions, and challenges. *Computer Communications*. № 149. 2020. P. 270–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014>
13. Romaniuk L., Bernas M., Kartashov V., Chykhira I., Tulaidan H. Aircraft automation principles as a basis for the use of information technologies. *CEUR Workshop Proceedings*. № 3742. 2024. P. 270–282.
14. Romaniuk L., Chykhira I., Tulaidan H., Myktyshyn A. Model of motion route of unmanned aerial vehicles operations with obstacles avoidance. *ICAAEIT 2021 – Mathematical modeling in power engineering and information technologies*. Ternopil : TNTU; Zhytomyr : Publishing house “Book-Druk”, 2021. P. 193–199. Retrieved from <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/36948> (last accessed: 05.10.2025).
15. Romaniuk L., Chykhira I., Kartashov V., Dombrovskiy I. UAV movement planning in mountainous terrain. *Scientific Journal of TNTU*. Vol. 110(2). 2023. P. 15–22. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.02.015

References:

1. Zhu, Z., He, J., Hou, L., Xu, L., Zhu, W., & Wang, L. (2024). *Emergency localization for mobile ground users: An adaptive UAV trajectory planning method*. Beijing University of Posts and Telecommunications. [In English].
2. Ma, Z., & Chen, J. (2022). Adaptive path planning method for UAVs in complex environments. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. № 115, 103133. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103133> [In English].
3. Liu, W., Zheng, Z., & Cai, K. (2013). Adaptive path planning for unmanned aerial vehicles based on bi-level programming and variable planning time interval. *Chinese Journal of Aeronautics*. № 26, 646–660. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.04.041> [In English].

4. Wang, L., Zhang, J., Chuan, J., Ma, R., & Fei, A. (2020). Edge intelligence for mission cognitive wireless emergency networks. *IEEE Wireless Communications*. № 27(4), 103–109. [In English].
5. Wu, H., Chen, J., Xu, W., Cheng, N., Shi, W., Wang, L., & Shen, X. (2020). Delay-minimized edge caching in heterogeneous vehicular networks: A matching-based approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. № 19(10), 6409–6424. [In English].
6. Wu, H., Lyu, F., Zhou, C., Chen, J., Wang, L., & Shen, X. (2020). Optimal UAV caching and trajectory in aerial-assisted vehicular networks: A learning-based approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. № 38(12), 2783–2797. [In English].
7. Han, G., Yang, X., Liu, L., Zhang, W., & Guizani, M. (2020). A disaster management-oriented path planning for mobile anchor node-based localization in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*. № 8(1), 115–125. [In English].
8. Ebrahimi, D., Sharafeddine, S., Ho, P.-H., et al. (2021). Autonomous UAV trajectory for localizing ground objects: A reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. Vol. 20(4), 1312–1324. [In English].
9. Wu, J., Yuan, W., Liu, F., Cui, Y., Meng, X., & Huang, H. (2022). UAV-based target tracking: Integrating sensing into communication signals. *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*. 309–313. [In English].
10. Yu, X., Liu, Z., Xu, L., & Wang, L. (2022). Lifetime maximization for UAV-enabled integrated localization and communication networks in emergency scenarios. *14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. 905–909. [In English].
11. Zhu, X., Wang, Y., & Xu, L. (2022). Minimizing the maximum length of flight paths for UAVs providing location service to ground targets. *IEEE Internet of Things Journal*. № 9(12), 9904–9917. [In English].
12. Aggarwal, S., & Kumar, N. (2020). Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. *Computer Communications*. № 149, 270–299. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.014> [In English].
13. Romaniuk, L., Bernas, M., Kartashov, V., Chykhira, I., & Tulaidan, H. (2024). Aircraft automation principles as a basis for the use of information technologies. *CEUR Workshop Proceedings*. № 3742, 270–282. [In English].
14. Romaniuk, L., Chykhira, I., Tulaidan, H., & Mykytyshyn, A. (2021). Model of motion route of unmanned aerial vehicles operations with obstacles avoidance. *ICAAEIT 2021 – Mathematical modeling in power engineering and information technologies*. (Ternopil : TNTU; Zhytomyr: Publishing house “Book-Druk”), 193–199. Retrieved from <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/36948> (last accessed: 05.10.2025). [In English].
15. Romaniuk, L., Chykhira, I., Kartashov, V., & Dombrovskyi, I. (2023). UAV movement planning in mountainous terrain. *Scientific Journal of TNTU*. Vol. 110(2), 15–22. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.02.015 [In English].