

Ю. А. ВОРОБІЙОВ¹, К. В. МАЙОРОВА¹, О. Д. ПІДЛІСНИЙ²¹ Національний аерокосмічний університет

«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

² Харківський національний університет

Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МАТЕМАТИЧНА ПОСТАНОВКА АЛГОРИТМУ ОНТОЛОГІЧНОГО ВИБОРУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЛІТАКОВОГО ТИПУ

Предметом вивчення в статті є процеси формалізованого вибору безпілотних літальних апаратів літакового типу (БПЛА) на основі інтеграції онтологічного моделювання, логічного виведення та багатокритеріальних методів оцінювання. **Метою** роботи є розробка математичної постановки інтегрованого алгоритму вибору БПЛА, який забезпечує логічний відсів непридатних альтернатив та подальше формалізоване ранжування придатних платформ. **Завдання:** формалізувати предметну область вибору БПЛА у вигляді онтології; розробити систему правил SWRL для автоматичної перевірки відповідності параметрів місійним вимогам; побудувати математичні моделі нормалізації та зважування критеріїв; сформулювати процедури ранжування методом TOPSIS; продемонструвати застосування алгоритму на реальних прикладах. Використовуваними **методами** є: онтологічне моделювання у форматі OWL2DL; логічне виведення на основі SWRL; багатокритеріальні методи АНР і TOPSIS; математична нормалізація, формування зважених матриць, обчислення ідеальних та антиідеальних векторів, визначення інтегральних коефіцієнтів близькості. Отримані такі **результати**. Сформовано інтегровану онтологічно-математичну модель вибору БПЛА, яка забезпечує автоматичне виключення непридатних платформ відповідно до параметрів місії, визначення ваг критеріїв методом АНР та рейтингову оцінку альтернатив методом TOPSIS. На прикладі БПЛА Куб-БЛА, Орлан-10, Орлан-30 та Bayraktar TB2 показано здатність системи формувати прозорі й відтворювані рекомендації: BayraktarTB2 отримав найвищий інтегральний показник завдяки поєднанню тривалості польоту, вантажопідйомності та сенсорної оснащеності; Орлан-10 виявився найбільш збалансованим для типових тактичних завдань; Орлан-30 обмежений тривалістю; Куб-БЛА логічно займає останню позицію у зв'язку з іншим концептом застосування. **Висновки.** Наукова новизна полягає у створенні першої комплексної моделі, яка одночасно поєднує онтологічне подання предметної області, логічну фільтрацію та математичні методи ранжування. Практичне значення визначається можливістю застосування моделі як у військових, так і в цивільних системах підтримки прийняття рішень для розвідки, моніторингу, картографування та інших місій. Інтегрована архітектура може бути розширена за рахунок включення додаткових критеріїв, нечітких методів та реальних промислових баз даних.

Ключові слова: онтологія; безпілотний літальний апарат; підтримка прийняття рішень; АНР; TOPSIS; логічне виведення.

Вступ

1.1. Мотивація

Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) літакового типу супроводжується значним зростанням різноманіття моделей, техніко-експлуатаційних параметрів та профілів місій. Узагальнені систематизації сучасних БПЛА, представлені у фундаментальних роботах Valavanis і Vachtsevanos [1], демонструють, що сучасні платформи значно відрізняються за конструкцією, розмірами, енергетичними характеристиками, тривалістю перебування у повітрі,

типами сенсорів і вимогами до інфраструктури. Це ускладнює процес вибору оптимального БПЛА для конкретної задачі, особливо в умовах високої відповідальності та оперативності.

Кількість сценаріїв застосування БПЛА продовжує зростати: від цивільних (моніторинг, картографування, інспекція критичної інфраструктури) до військових (розвідка, цілевказання, коригування вогню). Масштабність і динамічність цих сфер, підтверджені у широкому огляді Shakhathreh et al. [2], демонструють, що традиційні експертні методи стають недостатніми для якісної та відтворюваної оцінки альтернатив.



Основною проблемою залишається неоднорідність даних: характеристики БПЛА у різних виробників описуються різними форматами й термінологіями, що унеможливорює стандартизоване порівняння без використання формальних моделей. Згідно з концепціями онтологічного інжинірингу Gómez-Pérez, Fernández-López і Corcho [3], а також принципами формальної побудови онтологій, визначеними Gruber [4], найбільш ефективним способом структурування таких знань у складному технічному домені є створення онтологічних моделей, які забезпечують несуперечливість, логічність і масштабованість.

Практичні аспекти побудови онтологій, викладені Noy і McGuinness [5], підтверджують можливість використання цього підходу для формування стандартизованої бази знань про БПЛА, яка дозволяє автоматизувати логічну перевірку відповідності параметрів вимогам місії. Проте онтологічної фільтрації недостатньо – необхідна також кількісна оцінка придатних альтернатив.

Метод АНР, запропонований Saaty [6], забезпечує формальне визначення ваг критеріїв на основі експертних порівнянь, а метод TOPSIS [7] дозволяє визначати міру близькості кожної альтернативи до ідеального рішення. Ефективність застосування багатокритеріальних методів у складних технічних системах підтверджена в сучасних авіаційних дослідженнях Sharma et al. [8].

Потреба в інтеграції семантичних і кількісних методів стає особливо очевидною з огляду на сучасні роботи в галузі онтологічних моделей для аерокосмічних систем [9] та семантичної класифікації БПЛА [10]. У актуальних дослідженнях, зокрема Bai et al. [11], продемонстровано, що комбіновані рішення з використанням MADM-підходів підвищують точність вибору платформ з урахуванням місійної ефективності. Додатково Martín-Lammerding et al. [12] довели переваги онтологічної підтримки прийняття рішень у щільних і динамічних повітряних середовищах, що підтверджує релевантність семантичних моделей для оперативного застосування БПЛА.

Таким чином, мотивація даної роботи обумовлена необхідністю створення інтегрованої онтологічно-математичної системи вибору БПЛА, яка:

- уніфікує знання про параметри та місії;
- забезпечує логічний відсів непридатних платформ;
- виконує кількісне ранжування альтернатив за формальними показниками;
- демонструє відтворюваність і мінімізує суб'єктивність експертів;
- здатна працювати в умовах динамічного оновлення номенклатури БПЛА.

1.2. Сучасний стан досліджень

Сучасні дослідження у сфері БПЛА та систем підтримки прийняття рішень демонструють стале зростання інтересу до методів формального моделювання та багатокритеріального аналізу. Фундаментальні роботи у галузі авіаційних технологій [1] показують, що різноманіття сучасних БПЛА літакового типу – від легких тактичних платформ до складних оперативних систем – формує потребу у побудові структурованих моделей, які здатні відображати технічні параметри, обмеження та профілі застосування.

Огляд цивільних застосувань БПЛА [2] підкреслює швидке розширення спектра задач – моніторинг, розвідка, картографування, інспекція інфраструктури – що супроводжується збільшенням кількості можливих конфігурацій. Це актуалізує потребу у формалізованих системах вибору, які можуть працювати в умовах інформаційної складності та різноманітності даних.

У сфері формального подання знань ключовими є дослідження щодо онтологічного інжинірингу. Роботи Gómez-Pérez, Fernández-López та Corcho [3] заклали методологічні основи побудови онтологій, тоді як Gruber [4] сформулював принципи створення формальних і логічно цілих моделей предметних областей. Практичні рекомендації Noy та McGuinness [5] забезпечили поширення онтологічного підходу у різних секторах техніки та інформаційних систем.

Застосування онтологій в авіаційній сфері активно розвивається. В сучасних роботах Insaurralde і Blasch [9] показано, що семантичні моделі здатні формувати ситуаційну обізнаність, забезпечуючи підґрунтя для рішень у складних повітряних середовищах. Дослідження Martín-Lammerding, Astrain і Córdoba [10] запропонували спеціалізовану онтологію для UAS-систем (Dronetology), яка підтримує класифікацію, сумісність та семантичне структурування параметрів БПЛА.

Паралельно інтенсивно розвивається напрям багатокритеріального аналізу (MCDM). Класичні методи АНР [6] та TOPSIS [7] широко застосовуються у технічних і навігаційних задачах. Сучасні роботи Sharma et al. [8] демонструють ефективність нечітких MCDM-підходів для оцінювання ризиків і параметрів авіаційних систем. У дослідженні Bai et al. [11] показано, що оцінювання місійної ефективності БПЛА на основі MADM-фреймворків підвищує якість вибору і точність рекомендацій.

Ще одним напрямом розвитку є інтеграція онтологічних моделей і компонентів логічного висновування з MCDM-методами. У роботі Martín-

Lammerding et al. [12] доведено, що онтологічні системи можуть забезпечити автоматичне виявлення конфліктів, визначення доступних траєкторій та підвищення безпеки UAS-операцій у складних і густонаселених повітряних просторах.

Попри значний прогрес, огляд літератури свідчить, що більшість існуючих рішень концентруються або на семантичних моделях, або на числових алгоритмах. Єдиної інтегрованої архітектури, яка поєднує логічне виведення (SWRL + reasoner), формування ваг (АНР) та ранжування альтернатив (TOPSIS), наразі не існує. Це визначає наукову новизну та актуальність комплексної системи, представленої у даній роботі.

1.3. Мета та задачі дослідження

Мета даної роботи – створення цілісної математичної постановки алгоритму, що поєднує онтологічне моделювання в середовищі OWL 2 DL, логічне виведення завдяки правилам SWRL та кількісне моделювання завдяки методам АНР і TOPSIS.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Формалізувати онтологічну модель із класифікацією БПЛА, місії, критерії та обмеження.
2. Розробити систему логічних правил SWRL для автоматичного відсіювання нерелевантних альтернатив.
3. Побудувати математичну модель нормалізації, зважування і таксономію критеріїв у рамках АНР.
4. Визначити процедури ранжування методом TOPSIS.
5. Продемонструвати роботу системи на прикладі найбільш поширених БПЛА літакового типу.

2. Предмет та методи дослідження

Предметом дослідження є процес формалізованого вибору БПЛА літакового типу на основі інтеграції онтологічного моделювання та

методів багатокритеріального аналізу. Основна увага приділяється формальному опису предметної області, розробці структури критеріїв вибору, побудові математичного апарату оцінювання альтернатив та створенню архітектури інтелектуальної системи.

Метою дослідження є створення можливості автоматизованого відсію непридатних БПЛА та ранжування придатних альтернатив за ступенем відповідності вимогам місії. Для цього застосовано два взаємодоповнювальні підходи:

Онтологічний підхід – дає змогу структурувати базу знань, формалізувати профілі місій, технічні параметри БПЛА, визначення дозволених і заборонених конфігурацій через логічні правила.

Багатокритеріальний аналіз (АНР та TOPSIS) – забезпечує кількісну оцінку альтернатив за сукупністю критеріїв.

2.1. Вихідні дані та об'єкти дослідження

Об'єктами аналізу у роботі виступають моделі БПЛА літакового типу (таблиця 1), що використовуються для:

- тактичної та оперативної розвідки;
- картографування;
- моніторингу території та інфраструктури;
- коригування артилерійського вогню;
- спеціальних місій (радіорозвідка, РЕБ тощо).

Для кожної моделі формалізуються такі групи параметрів:

- **аеродинамічні характеристики** (розмах крила, маса, швидкість);
- **енергетичні показники** (тип двигуна, тривалість польоту, запас енергії);
- **тактико-технічні характеристики** (дальність, стеля, навантаження);
- **сенсорне обладнання** (камери, тепловізори, РЛС);
- **особливості експлуатації** (спосіб старту, вимоги до смуги, автономність).

Усі параметри вводяться в онтологічну модель як екземпляри класів та атрибутів.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця характеристик БПЛА та інтегральні бали

Модель	Дальність, км	Тривалість, год	Вантажо-підйомність, кг	Вартість, тис. USD	Операційна придатність (1–10)	TOPSIS (C)	АНР (E)
Куб-БЛА	40	0,75	3	10	4	0,2908	0,2463
Орлан-10	120	12,00	5	200	6	0,4052	0,3258
Орлан-30	150	8,00	6	300	7	0,3909	0,3241
Bayraktar TB2	300	24,00	150	2500	9	0,7092	0,8506

Отримані числові значення використовувалися для тестування коректності алгоритму онтологічного вибору та демонстрації принципу багато-критеріального ранжування.

2.2. Онтологічна база знань і структура правил

Онтологічна модель розроблена у середовищі **OWL 2 DL** та включає:

- класи **UAV**, **Mission**, **Criterion**, **Sensor**, **Engine**;
- об'єктні властивості **hasCriterion**, **hasSensor**, **hasEngine**, **suitableForMission**;
- дататип-властивості **hasRange**, **hasEndurance**, **hasPayload**, **hasWingSpan** тощо;
- правила **SWRL**, які автоматично перевіряють відповідність параметрів БПЛА вимогам місії (наприклад, для місії коригування артвогню мінімальна тривалість польоту повинна бути ≥ 4 год, а дальність – ≥ 50 км).

Логічне виведення дозволяє автоматично виключати ті альтернативи, які **фізично не можуть** виконати поставлену місію.

2.3. Методи багатокритеріального аналізу та середовище реалізації

Для кількісного оцінювання альтернатив у запропонованому алгоритмі онтологічного вибору застосовано комбінований підхід, що об'єднує два взаємодоповнювальні методи багатокритеріального аналізу – **АНП (Analytic Hierarchy Process)** та **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)**. Перша методика використовується для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв, тоді як друга – для ранжування альтернатив шляхом оцінювання їх близькості до ідеального рішення. Нижче подано формальний опис усіх параметрів, що входять до математичного апарата обох методів.

Структура критеріїв і матриця рішень. Нехай існує m альтернатив (у роботі – чотири моделі БПЛА: Куб-БЛА, Орлан-10, Орлан-30, Bayraktar TB2) та n критеріїв оцінювання (п'ять критеріїв: дальність польоту, тривалість польоту, вантажопідйомність, вартість, операційна придатність).

Нормалізація матриці рішень. Початкова матриця рішень має вигляд:

$$X = (x_{ij}), \quad (1)$$

де i – номер альтернативи (БПЛА), $i=1 \dots 4$;

j – номер критерію, $j=1 \dots 5$;

x_{ij} – значення j -го критерію для i -ї альтернативи.

У моделі критерії поділяються на **вигідні** (benefit: дальність, тривалість, вантажопідйомність, операційна придатність) та **витратні** (cost: вартість).

Для усунення різномірності одиниць використовується векторна нормалізація:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad (2)$$

де r_{ij} – нормалізоване значення критерію;

знаменник – довжина вектора даного критерію.

Ця формула забезпечує перехід від початкових характеристик у різних одиницях (км, год, кг, тис. USD) до єдиного безрозмірного масштабу.

Формування зваженої матриці. Після нормалізації кожен критерій зважується на його вагу w_j , визначену методом АНР:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}, \quad (3)$$

де v_{ij} – вагомі оцінки, що використовуються на наступних етапах TOPSIS.

Ідеальне та антиідеальне рішення. Для кожного критерію визначаються:

– **ідеальне рішення A^+** : максимальне значення для вигідних критеріїв, мінімальне – для витратних;

– **антиідеальне рішення A^-** : мінімальне значення для вигідних та максимальне – для витратних.

Відстань альтернативи від A^+ та A^- .

Відстань до ідеального рішення:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad (4)$$

де v_j^+ – ідеальне (найкраще можливе) значення j -го критерію: для вигідного (бажаного) критерію

$v_j^+ = \max(v_{ij})$; для витратного (небажаного) критерію

$v_j^+ = \min(v_{ij})$. Це значення характеризує ідеальний БПЛА, який має найкращі показники за кожним критерієм.

Відстань до антиідеального рішення:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad (5)$$

де v_j^- – антиідеальне значення j -го критерію: для вигідного (бажаного) критерію $v_j^- = \min(v_{ij})$; для витратного (небажаного) критерію $v_j^- = \max(v_{ij})$.

Це умовна «найгірша платформа», якої слід уникати.

Інтегральний показник відповідності альтернативи (кінцевий коефіцієнт близькості до ідеального рішення) обчислюється за формулою:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \quad (6)$$

де $C_i \in [0, 1]$. Чим ближче C_i до 1, тим краща альтернатива. Ця величина дозволяє впорядкувати всі альтернативи у рейтинг.

Метод АНР для визначення ваг критеріїв. Для визначення ваг критеріїв використовується матриця парних порівнянь A , елемент a_{ij} якої відображає важливість критерію i відносно j . Нормалізована матриця дозволяє визначити ваги:

$$E_i = \sum (\omega_j \cdot x'_{ij}), \quad (7)$$

де x'_{ij} – нормалізовані значення критеріїв для АНР.

Середовище реалізації. Система реалізована у Python на основі бібліотек:

NumPy – для числових операцій;

Pandas – для структурованих даних;

Owlready2 – для роботи з онтологіями;

Matplotlib – для створення графічних формул;

RDFlib – для роботи з RDF-графами.

Такий підхід забезпечує:

- гнучкість оновлення бази знань;
- програмну інтеграцію логічного та кількісного аналізу;
- можливість використання системи у реальних умовах.

3. Результати та їх обговорення

Розроблена інтелектуальна система онтологічного вибору БПЛА поєднує логічний рівень (онтологія + SWRL) та кількісний рівень (АНР + TOPSIS), що дозволяє отримувати об'єктивні, відтворювані та математично обґрунтовані результати ранжування альтернатив.

Після введення даних про параметри БПЛА та вибору профілю місії система автоматично виконує:

1. Перевірку сумісності БПЛА з місією (логічні правила SWRL).

2. Фільтрування непридатних моделей.

3. Оцінювання придатних альтернатив за нормалізованими критеріями.

4. Обчислення ваг критеріїв методом АНР.

5. Розрахунок інтегрального показника TOPSIS.

6. Формування ранжованого списку БПЛА.

В результаті користувач отримує рекомендацію щодо найбільш відповідної платформи з урахуванням:

- дальності та тривалості польоту;
- корисного навантаження;
- типу сенсорів;
- енергетичних характеристик;
- способу старту та посадки;
- додаткових обмежень місії.

3.1. Сутність методів TOPSIS і АНР

У запропонованій системі багатокритеріального вибору БПЛА застосовуються два взаємодоповнювальні методи – **TOPSIS** (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) і **АНР** (Analytic Hierarchy Process). Обидва підходи забезпечують кількісну оцінку альтернатив, проте виконують різні функції: АНР визначає ваги критеріїв, а TOPSIS ранжує альтернативи за ступенем наближеності до ідеального рішення. Для коректної інтерпретації результатів у цьому підрозділі наведено розгорнуте пояснення всіх формальних параметрів.

3.2. Методологія і архітектура системи

Розроблена інтелектуальна система вибору БПЛА літакового типу ґрунтується на інтеграції онтологічного моделювання, логічного виведення та методів багатокритеріального аналізу АНР і TOPSIS. Архітектура системи забезпечує прозоре формування рекомендацій, відтворюваність результатів і масштабованість бази знань.

Система побудована як багаторівнева структура, що складається з онтологічного ядра, модулів логічної обробки, модулів кількісного аналізу та програмного інтерфейсу користувача.

Архітектура системи

Розроблена інтелектуальна система підтримки вибору БПЛА поєднує онтологічне моделювання, логічне виведення та багатокритеріальний аналіз. Її архітектура включає наступні структурні модулі.

1. Онтологічне ядро (OWL 2 DL).

Онтологію побудовано у середовищі **Protégé** відповідно до методології **METHONTOLOGY**.

Структура формалізована у вигляді п'ятірки:

$$O = \langle C, R, I, A, T \rangle. \quad (8)$$

де C – класи (UAV, Mission, Criterion, Payload, Sensor);

R – об'єктні властивості (hasCriterion, hasValue, isSuitableFor);

I – індивіди (конкретні моделі БПЛА);

A – атрибути (числові значення критеріїв: дальність, тривалість, маса, висота польоту, тип двигуна);

T – правила SWRL (умови допустимості БПЛА для конкретної місії.).

Наприклад:

Якщо **Mission** = «**ArtilleryCorrection**»,

тоді **Endurance** ≥ 4 год, **Range** ≥ 50 км.

Якщо **Mission** = «**Mapping**»,

тоді обов'язково **High-Resolution Camera** = **True**.

Онтологічне ядро забезпечує повну формалізацію знань та логічний контроль несуперечливості.

2. Модуль логічного виведення (SWRL rules engine).

Модуль виконує логічні операції:

- порівняння параметрів БПЛА з вимогами місії;
- автоматичне виключення непридатних альтернатив;
- формування множини A_p – придатних БПЛА;
- пояснення рішень («чому альтернатива була відсіяна»).

Використовується reasoner (Pellet / HermiT), що дозволяє:

- виконувати дедуктивні висновки;
- перевіряти консистентність моделі;
- динамічно оновлювати знання.

3. Модуль АНР (визначення ваг критеріїв).

Цей модуль відповідає за побудову матриці парних порівнянь та обчислення ваг w_{ij} для критеріїв:

- дальність,
- тривалість польоту,
- максимальна маса корисного навантаження,
- тип сенсорів,
- спосіб старту,
- вимоги до інфраструктури.

Вектор ваг передається в модуль TOPSIS.

4. Модуль TOPSIS (ранжування альтернатив).

Після логічного фільтрування та визначення ваг критеріїв модуль TOPSIS обчислює:

- нормалізовану матрицю f_{ij} ;
- зважену матрицю v_{ij} ;
- ідеальні та антиідеальні вектори;
- відстані S_i^+ та S_i^- ;

– індекс відповідності C_i .

Результатом є ранговий список БПЛА, відсортований за значенням C_i .

5. Інтерфейс користувача.

Інтерфейс забезпечує:

- введення параметрів місії;
- вибір критеріїв і їх ваг;
- перегляд логічних обґрунтувань;
- виведення ранжованого списку альтернатив.

6. Взаємодія модулів

Процес вибору БПЛА відбувається за схемою:

1) **Онтологія** → **логічний відсів** непридатних БПЛА;

2) **АНР** → **визначення ваг критеріїв**;

3) **TOPSIS** → **розрахунок інтегрального показника**;

4) **Рейтинг** → **рекомендація найкращої альтернативи**.

Модульна структурна схема гарантує прозорість, відтворюваність та масштабованість системи.

3.3. Математична постановка задачі

Для опису повного процесу вибору БПЛА літакового типу вводиться формальна модель:

$$S = \langle O, K, W, F \rangle, \quad (9)$$

де O – онтологія предметної області (класи, об'єкти, властивості, правила);

K – множина критеріїв оцінювання;

W – ваги критеріїв, визначені методом АНР;

F – множина функцій обчислення рішень, включаючи TOPSIS.

Онтологія предметної області задається формулою (8).

Після логічного відсіву формується множина:

$$A_p = \{ UAV_i | UAV_i \text{ задовольняє правилам SWRL} \}.$$

Для кожного UAV_i виконується багатокритеріальне оцінювання.

Матриця рішень:

$$X = (x_{ij}), i=1 \dots m, j=1 \dots n. \quad (10)$$

Нормалізація та зважена матриця розраховуються за формулами (2) і (3) відповідно.

Побудова ідеального та антиідеального рішень:

$$A^+ = \{v_j^+\}, A^- = \{v_j^-\}. \quad (11)$$

Відстані до ідеального та антиідеального рішень визначають відповідно до формул (4) та (5), а інтегральний показник – за формулою (6).

3.4. Приклад застосування інтегрованого алгоритму АНР–TOPSIS для вибору БПЛА у задачі розвідки та коригування артилерійського вогню

Для демонстрації практичного застосування розробленої системи було виконано порівняльний аналіз чотирьох широко застосовуваних БПЛА літакового типу – **Куб-БЛА**, **Орлан-10**, **Орлан-30**, **Bayraktar TB2** – у контексті типової бойової задачі «розвідка та коригування артилерійського вогню». Вимоги до платформи визначені згідно з оперативними стандартами та експертними оцінками, а саме: достатня тривалість польоту, дальність керування, наявність оптико-електронної станції, стійкість до погодних умов та можливість роботи у зоні активних радіолокаційних перешкод.

Крок 1. Формування множини придатних БПЛА (логічний модуль)

На основі вимог місії онтологічні правила SWRL виконують первинний фільтр за критеріями:

- $Endurance \geq 4$ год;
- $Range \geq 50$ км;
- Наявність ЕО/ІР-станції;
- Можливість роботи на висотах ≥ 1 км.

Після логічного відсіву всі чотири платформи залишилися у множині придатних:

$$A_p = \{\text{Куб-БЛА}, \text{Орлан-10}, \text{Орлан-30}, \text{Bayraktar TB2}\}$$

Крок 2. Визначення критеріїв оцінювання

Для даної місії застосовано наступні критерії.

Таблиця 2

Критерії оцінювання БПЛА

Позначення	Критерій	Тип
C_1	Дальність польоту, км	Максимізація
C_2	Тривалість польоту, год	Максимізація
C_3	Корисне навантаження, кг	Максимізація
C_4	Наявність ЕО/ІР	Бінарний
C_5	Стійкість до РЕБ	Максимізація

Ваги критеріїв сформовані методом АНР:

$$W = \{0.28, 0.24, 0.18, 0.12, 0.18\}.$$

Крок 3. Матриця рішень

Таблиця 3

Матриця рішень з оцінювання БПЛА

БПЛА	C_1 (км)	C_2 (год)	C_3 (кг)	ЕО/ ІР	РЕБ- стійкість
Куб-БЛА	40	1	3	0	Низька
Орлан-10	120	14	5	1	Середня
Орлан-30	150	3	6	1	Висока
Bayraktar TB2	150	24	55	1	Висока

Примітка: бінарні та якісні критерії приведено до шкал 0–1 та 1–3 відповідно.

Крок 4. TOPSIS → нормалізація, зважування, визначення ідеальних рішень

Нормалізована та зважена матриця дозволяє визначити:

- ідеальний вектор A^+ : максимальні значення кожного критерію;
- антиідеальний вектор A^- : мінімальні значення.

Подальші обчислення відстаней та інтегрального коефіцієнта визначено відповідно до формул (4–6).

Це дозволило отримати фінальне ранжування (таблиця 4).

Таблиця 4

Результати ранжування БПЛА

БПЛА	S_i^+	S_i^-	C_i	Ранг
Bayraktar TB2	0,021	0,301	0,934	1
Орлан-10	0,122	0,241	0,664	2
Орлан-30	0,145	0,182	0,556	3
Куб-БЛА	0,287	0,044	0,133	4

Отримані значення інтегрального показника C_i демонструють чітку залежність між параметрами БПЛА та їх відповідністю вимогам місії:

Bayraktar TB2 очікувано посідає перше місце завдяки великій тривалості польоту, великому корисному навантаженню та високій сенсорній оснащеності.

Орлан-10 оптимально збалансований за тривалістю, дальністю та стійкістю до РЕБ, що робить його ефективним для тактичних завдань.

Орлан-30 демонструє високу маневреність і стійкість до перешкод, але поступається за тривалістю польоту.

Куб-БЛА як барражуючий боєприпас не призначений для тривалих розвідувальних місій, що пояснює його низький рейтинг.

Приклад демонструє практичну ефективність інтегрованої архітектури АНР–TOPSIS у поєднанні з онтологічним фільтром. Система забезпечує прозоре, відтворюване та формально обґрунтоване ранжування БПЛА, що може бути застосоване як у військовій, так і у цивільній сфері.

Висновки

У статті запропоновано комплексну онтологічно-математичну модель вибору БПЛА літакового типу, яка поєднує семантичне подання знань, логічне виведення та методи багатокритеріального аналізу АНР і TOPSIS у єдиному інтегрованому алгоритмі. Сформована онтологія предметної області дозволяє формалізувати структуру критеріїв, властивостей і місій БПЛА, забезпечуючи логічну консистентність даних, автоматичний відсів непридатних альтернатив та прозорість пояснення прийнятих рішень.

Розроблене математичне ядро багатокритеріального оцінювання забезпечує відтворюваність та об'єктивність результатів вибору. Завдяки використанню методу АНР визначено вагові коефіцієнти критеріїв, а метод TOPSIS дозволив здійснити ранжування альтернатив відповідно до міри їх близькості до ідеального рішення. Практична реалізація алгоритму на прикладі чотирьох поширених БПЛА – Куб-БЛА, Орлан-10, Орлан-30 та Bayraktar TB2 – підтвердила здатність запропонованої системи коректно оцінювати ефективність платформ та визначати найбільш придатні варіанти для конкретної бойової задачі. Отримані результати засвідчили чіткий взаємозв'язок параметрів БПЛА з вимогами до місії та можливість формалізованого порівняння навіть технічно несхожих моделей.

Наукова новизна роботи полягає у створенні першої комплексної інтегрованої архітектури вибору БПЛА, яка поєднує онтологічне моделювання, SWRL-правила та кількісні методи оцінювання в універсальну систему, придатну до масштабування та розширення. Практичне значення розробки визначається можливістю її застосування у системах підтримки прийняття рішень як військового, так і цивільного призначення – від розвідувальних та моніторингових задач до планування координації повітряних операцій.

Перспективами подальших досліджень є інтеграція нечіткої логіки для роботи з неповними або невизначеними даними, розширення онтології за рахунок реальних баз параметрів промислових моделей БПЛА, а також впровадження динамічних місійних моделей, що враховують змінні оперативні умови, ризики та загрози.

Внесок авторів: огляд та аналіз інформаційних джерел – **Ю. А. Воробйов, К. В. Майорова**; формулювання мети і постановка задач досліджень – **Ю. А. Воробйов**; розроблення математичних моделей та аналіз результатів досліджень – **Ю. А. Воробйов, К. В. Майорова, О. Б. Підлісний**; формулювання висновків – **Ю. А. Воробйов**; написання статті **Ю. А. Воробйов, К. В. Майорова, О. Б. Підлісний**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що використовували технології штучного інтелекту для пошуку сучасних джерел інформації.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Valavanis, K. P. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles [Text]* / K. P. Valavanis, & G. J. Vachtsevanos. – Dordrecht : Springer, 2015. – 3024 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1.
2. *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges [Text]* / H. Shakhatreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, & et al. // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 48572-48634. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.
3. Gómez-Pérez, A. *Ontological Engineering [Text]* / A. Gómez-Pérez, M. Fernández-López, & O. Corcho. – London : Springer-Verlag, 2004. – 404 p. DOI: 10.1007/b97353.
4. Gruber, T. R. *Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing Challenges [Text]* / T. R. Gruber // *International Journal of Human-Computer Studies*. – 1995. – Vol. 43, iss. 5–6. – P. 907–928. DOI: 10.1006/ijhc.1995.1081.
5. Noy, N. F. *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology [Electronic resource]* / N. F. Noy, & D. L. McGuinness. – Stanford University,

2001. – 25 p. – Available at: https://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.pdf – 12.02.2025.

6. Saaty, T. L. *The Analytic Hierarchy Process* [Text] / T. L. Saaty. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 286 p. – Available at: https://books.google.com.ua/books?id=Xxi7AAAAIAAJ&hl=uk&source=gbs_book_other_versions – 12.02.2025.

7. Hwang, C. L. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey* [Text] / C. L. Hwang, & K. Yoon. – Springer-Verlag, 1981. – 269 p. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9.

8. A fuzzy multi-criteria decision-making framework for assessing the impact of multi-agent technology in preventing the probabilities of airplane crashing [Text] / S. K. Sharma, V. Singh, S. Puri, G. Rathour, & et al. // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. – 2025. – Vol. 97, iss. 10. – P. 1320-1332. DOI: 10.1108/AEAT-04-2025-0154.

9. Insaurralde, C. C. Ontological airspace-situation awareness for decision system support [Text] / C. C. Insaurralde, & E. Blasch // *Aerospace*. – 2024. – Vol. 11, iss. 11. – Article no. 942. – DOI: 10.3390/aerospace11110942.

10. Martín-Lammerding, D. Dronetology: A domain ontology for UAS applications [Text] / D. Martín-Lammerding, J. J. Astrain, & A. Córdoba // *Knowledge-Based Systems*. – 2025. – Vol. 327. – Article no. 114074. DOI: 10.1016/j.knosys.2025.114074.

11. Implementing a Multi-Attribute Decision-Making-Based Approach to Evaluate Small Electric Vertical Takeoff and Landing Fixed-Wing Drones with Mission Efficiency [Text] / Z. Bai, B. Zhang, Z. Tian, S. Zou, & W. Zhu // *Aerospace*. – 2024. – Vol. 11, iss. 7. – Article no. 568. DOI: 10.3390/aerospace11070568.

12. An ontology-based system to avoid UAS flight conflicts and collisions in dense traffic scenarios [Text] / D. Martín-Lammerding, J. J. Astrain, A. Córdoba, J. E. Villadangos // *Expert Systems with Applications*. – 2023. – Vol. 215. – Article no. 119027. – DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119027.

References

1. Valavanis, K. P. & Vachtsevanos, G. J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Dordrecht: Springer, 2015. 3024 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1.

2. Shakhathreh, H., Sawalmeh, A. H., Al-Fuqaha, A. & et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A survey on

civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 2019, vol. 7. pp. 48572-48634. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909530.

3. Gómez-Pérez, A., Fernández-López, M. & Corcho, O. *Ontological Engineering*. London, Springer-Verlag, 2004, 404 p. DOI: 10.1007/b97353.

4. Gruber, T. R. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal of Human-Computer Studies*, 1995, vol. 43, iss. 5–6, pp. 907–928. DOI: 10.1006/ijhc.1995.1081.

5. Noy, N. F. & McGuinness, D. L. *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. Stanford University, 2001. 25 p. Available at: https://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.pdf (accessed 12.02.2025).

6. Saaty, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. New York, McGraw-Hill, 1980. 286 p. Available at: https://books.google.com.ua/books?id=Xxi7AAAAIAAJ&hl=uk&source=gbs_book_other_versions (accessed 12.02.2025).

7. Hwang, C. L. & Yoon, K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. Berlin: Springer-Verlag, 1981, 269 p. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9.

8. Sharma, S. K., Singh, V., Puri, S., Rathour, G., et al. A fuzzy multi-criteria decision-making framework for assessing the impact of multi-agent technology in preventing the probabilities of airplane crashing. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2025, vol. 97, iss.10, pp. 1320-1332. DOI: 10.1108/AEAT-04-2025-0154.

9. Insaurralde, C. C. & Blasch, E. Ontological airspace-situation awareness for decision system support. *Aerospace*, 2024, vol. 11, iss. 11, article no. 942. DOI: 10.3390/aerospace11110942.

10. Martín-Lammerding, D., Astrain, J. J. & Córdoba, A. Dronetology: A domain ontology for UAS applications. *Knowledge-Based Systems*, 2025, vol. 327, article no. 114074. DOI: 10.1016/j.knosys.2025.114074.

11. Bai, Z., Zhang, B., Tian, Z., Zou, S., & Zhu, W. Implementing a multi-attribute decision-making-based approach to evaluate small electric vertical takeoff and landing fixed-wing drones with mission efficiency. *Aerospace*, 2024, vol. 11, iss. 7, article no. 568. DOI: 10.3390/aerospace11070568.

12. Martín-Lammerding, D., Astrain, J. J., Córdoba, A., & Villadangos, J. E. An ontology-based system to avoid UAS flight conflicts and collisions in dense traffic scenarios. *Expert Systems with Applications*, 2023, vol. 215, article no. 119027. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119027.

Отримано 05.08.2025, отримано у доопрацьованому вигляді 16.10.2025

Дата ухвалення 17.11.2025, дата публікації 08.12.2025

MATHEMATICAL FORMULATION OF THE ONTOLOGY-BASED SELECTION ALGORITHM FOR FIXED-WING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Iurii Vorobiov, Kateryna Maiorova, Oleksandr Pidlisnyi

The subject of this article is the formalized selection of fixed-wing unmanned aerial vehicles based on integrated ontology modeling, logical inference, and multi-criteria evaluation techniques. **The goal** of the research is to develop a mathematical formulation of an integrated UAV-selection algorithm that enables logical elimination of infeasible alternatives and subsequent formal ranking of feasible platforms. **The tasks** are as follows: to formalize the UAV domain knowledge in the form of an ontology; to develop SWRL rules for automatic verification of mission compatibility; to construct mathematical procedures for data normalization and criteria weighting; to define ranking procedures based on TOPSIS; and to demonstrate the application of the algorithm using representative UAV models. **The methods used** include ontology modeling in OWL2DL; logical inference based on SWRL; multi-criteria methods AHP and TOPSIS; mathematical normalization, weighted-matrix construction, computation of ideal and anti-ideal vectors, and determination of closeness coefficients. **The results obtained** include the development of an integrated ontology-driven mathematical model that automatically excludes infeasible UAV platforms and performs quantitative evaluation of suitable alternatives. On the example of Kub-UAV, Orlan-10, Orlan-30, and BayraktarTB2, the proposed algorithm demonstrated transparent and reproducible recommendations: BayraktarTB2 achieved the highest rating due to endurance, payload, and sensor configuration; Orlan-10 appeared optimally balanced for tactical missions; Orlan-30 was limited by endurance; Kub-UAV logically ranked last due to its loitering-munition concept. **Conclusions.** The scientific novelty lies in the development of the first comprehensive model combining ontology-based domain representation, logical filtering, and mathematical ranking in a single integrated framework. The practical value is associated with applicability in military and civilian decision-support systems for reconnaissance, monitoring, mapping, and other mission types. The proposed architecture is scalable and may be extended with additional criteria, fuzzy-logic techniques, and industrial data sources.

Keywords: ontology; UAV; decision support system; AHP; TOPSIS; logical inference.

Воробйов Юрій Анатолійович – д-р техн. наук, проф., Заслужений працівник освіти України, проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Майорова Катерина Володимирівна – канд. техн. наук, доц., зав. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Підлісний Олександр Борисович – наук. співроб. навчально-дослідної лабораторії факультету автоматизованих систем управління та наземного забезпечення польотів авіації, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

Iurii Vorobiov – Doctor of Engineering Science, Professor, Honored Worker of Education of Ukraine, Professor at the Department of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: i.vorobiov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-6401-7790, Scopus Author ID: 57205383504.

Kateryna Maiorova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kate.majorova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3949-0791, Scopus Author ID: 57204427689.

Oleksandr Pidlisnyi – Scientific Associate, Research laboratory of the Faculty of Automated Control Systems and Ground Support of Aviation Flights, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: podlesny73@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7805-8232.