

doi: 10.32620/oikit.2026.108.21

УДК 004.82:004.89:629.735.083

Ю. А. Воробйов,
К. В. Майорова,
А. О. Сосунов

Інформаційна архітектура інтеграції онтологічної системи підтримки прийняття рішень з цифровими двійниками та цифровими нитками безпілотних літальних апаратів

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

У статті розглянуто процеси інтеграції онтологічної системи підтримки прийняття рішень (ОСППР) з цифровими двійниками та цифровими нитками безпілотних літальних апаратів літакового типу (БПЛА) для забезпечення трасованості рішень і підвищення точності економічних оцінок їх наслідків. Актуальність роботи обумовлена зростанням складності життєвого циклу БПЛА, динамічністю їх технічних і експлуатаційних характеристик та необхідністю прийняття обґрунтованих рішень в умовах неповної та змінної інформації. Метою роботи є розроблення концептуального та методичного підходу до інтеграції ОСППР з цифровими двійниками та цифровими нитками БПЛА з метою підвищення пояснюваності, трасованості та економічної обґрунтованості рішень. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: проаналізовано роль онтологічного моделювання у забезпеченні семантичної узгодженості цифрових двійників і цифрових ниток; запропоновано архітектуру інтегрованої системи «онтологія – цифровий двійник – цифрова нитка»; формалізовано механізм трасованості рішень; визначено вплив інтеграції на точність економічних оцінок. Результати дослідження полягають у формуванні підходу, що забезпечує динамічне уточнення економічних показників ефективності за рахунок синхронізації рішень з актуальними станами цифрових двійників та їх фіксації у цифровій нитці. Висновки підтверджують доцільність інтеграції ОСППР з технологіями Digital Twin і Digital Thread для підвищення керованості та економічної надійності рішень у сфері застосування БПЛА. Наукова новизна полягає у формалізації механізму трасованості рішень та їх економічних наслідків на основі онтологічно керованої цифрової нитки. Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованого підходу для підвищення точності техніко-економічного обґрунтування рішень при виборі та експлуатації БПЛА. Введено інваріант трасованості та функціональний зв'язок «стан → рішення → економіка», що формує основу для інтеграції з MBSE та цифровими платформами життєвого циклу виробу.

Ключові слова: БПЛА; онтологія; система підтримки прийняття рішень; цифровий двійник; цифрова нитка; трасованість; економічна ефективність.

1. Постановка проблеми

Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є одним із ключових напрямів сучасного авіабудування та цифрового виробництва [1]. Сучасні БПЛА характеризуються високою складністю конструкцій, значною кількістю інтегрованих електронних систем і необхідністю оперативного супроводу на всіх етапах життєвого циклу – від проєктування та виготовлення до експлуатації й технічного обслуговування (рис. 1). У зв'язку з останнім особливого значення набуває впровадження цифрових технологій, спрямованих на забезпечення безперервного обміну даними, підвищення ефективності управління виробами та скорочення часу прийняття інженерних рішень.

Становлення цифрових технологій у сфері БПЛА зумовив активну інтеграцію цифрового двійника (Digital Twin) та цифрової нитки (Digital Thread),

що в свою чергу створює цілісну архітектуру для управління даними протягом усього життєвого циклу виробу (ЖЦВ) – від концепції до утилізації.



Рис. 1. Приклади сучасних БПЛА: а – КУБ-БЛА; б – Орлан-30 [1]

У стандартах ISO 23247-1:2021 і ISO/IEC 30173:2023 визначено структуру цифрового двійника виробництва як така, що забезпечує конвергенцію між фізичним і цифровим станом з відповідною швидкістю синхронізації [2, 3]. Відсутність формалізованого семантичного ядра є головним бар'єром на шляху від простої візуалізації до справжнього інтелектуального ЖЦВ. Без нього «цифрова нитка» перетворюється на набір розрізнених посилань на файли, а «двійник» – на ізольовану 3D-модель з датчиками. Зазначені стандарти ISO 23247-1:2021 та ISO/IEC 30173:2023 визначають загальні принципи й термінологію цифрових двійників для виробництва. Проте ці документи не містять конкретної галузевої онтології або алгоритмів для БПЛА, тому створення семантичного ядра реалізується поза межами стандарту.

Як показано у систематичному огляді [4], відсутність онтологічного рівня призводить до неоднозначності інтерпретації атрибутів, обмежує інтероперабельність та ускладнює узгодження моделей між інформаційними системами. Онтологічно орієнтовані підходи до Digital Thread, запропоновані для задач раннього паралельного проектування та підтримки рішень [5, 6], демонструють потенціал формалізації зв'язків між артефактами ЖЦВ. Разом із тим, узагальнення сучасного стану Digital Thread в інженерії [7] свідчить, що ключовим обмеженням залишається недостатня формалізація трасованості рішень, тобто відновлюваності контексту: вихідних даних, обмежень, правил та станів системи, що вплинули на вибір.

У роботі [8] «Knowledge graph» підходи забезпечують інтеграцію інженерних даних, однак без поєднання з онтологічною системою підтримки прийняття рішень (ОСППР) не гарантують повної семантичної узгодженості та пояснюваності рішень. У домені безпілотних авіаційних систем ефективність доменних онтологій показано у роботах щодо формалізації обмежень і правил у задачах безпеки та узгодження траєкторій [9], а також у доменній онтології UAS [10]. Питання підтримки рішень в умовах невизначеності на основі онтологій досліджено у [11, 12], проте інтеграція онтологічної логіки з цифровим двійником як динамічною моделлю стану БПЛА та цифровою ниткою як механізмом наскрізної фіксації рішень лишається недостатньо формалізованою на рівні єдиної інформаційної архітектури.

Економічний аспект інтеграції цифрових двійників розглядається через оцінювання витрат впровадження [13] та через динамічні життєво-циклові оцінки

[14], а цифровий двійник у контексті ЖЦВ узагальнюється у [15]. Позиційний документ для аерокосмічної галузі [16] підкреслює необхідність інтеграції Digital Twin/Digital Thread, однак не задає формальної моделі зв'язків «рішення – стан – наслідок» [17].

Проаналізовані вище роботи не визначають формалізованої інформаційної моделі, що об'єднує онтологію, цифровий двійник і цифрову нитку в єдине середовище з повною трасованістю рішень. До всього ж відсутній досвід використання таких моделей для БПЛА. Таким чином, у науково-технічному дискурсі наразі не представлено цілісних формалізованих підходів до побудови архітектури, яка б забезпечувала безшовну інтеграцію ОСППР, Digital Twin та Digital Thread у тому числі з урахуванням специфіки функціонування БПЛА.

Отже, наявна науково-прикладна проблема полягає у відсутності формалізованої інформаційної архітектури, що інтегрує ОСППР, цифровий двійник і цифрову нитку БПЛА в єдиному семантично узгодженому цифровому середовищі та забезпечує повну трасованість управлінських і інженерних рішень. Тому метою дослідження є розроблення інформаційної архітектури інтеграції ОСППР з цифровими двійниками та цифровими нитками БПЛА.

Для досягнення поставленої мети було вирішено завдання з розроблення архітектури, що формалізує:

- 1) семантичне ядро (онтологію);
- 2) відображення понять онтології у параметри цифрового двійника;
- 3) граф цифрової нитки;
- 4) механізм трасованості рішень у цифровому середовищі БПЛА.

2. Методологічні засади дослідження

2.1. Загальна інформаційна архітектура інтеграції

Поняття «інформаційна архітектура інтеграції» трактується як організаційно-структурний опис інтегрованої онтологічної системи – тобто набір елементів, їх зв'язків та принципів побудови, що забезпечують інтеграцію даних і сервісів. Формально, це відповідає стандартному визначенню архітектури як «фундаментальної організації системи» ISO/IEC/IEEE 42010. Інтегрована інформаційна система підтримки прийняття рішень у цифровому середовищі БПЛА розглядається як багаторівнева структура, що поєднує семантичний, динамічний, аналітичний та трасувальний рівні

Формально інтегрована система визначається рівнянням:

$$S = \langle O, DT, T, A, \Gamma \rangle, \quad (1)$$

де O – онтологічне семантичне ядро; $DT = \{DT_1, DT_2, \dots, DT_n\}$ – множина

цифрових двійників альтернатив БПЛА; $T = (V, E)$ – цифрова нитка (граф ЖЦВ); A – аналітичні та економічні модулі;

Γ – механізм синхронізації та забезпечення трасованості.

Примітка. Множина $DT = \{DT_1, DT_2, \dots, DT_n\}$ у формулі (1) включає цифрові двійники, релевантні різним фазам ЖЦВ БПЛА (проекування, виробництва, експлуатації/ремонту). Для кожної фази та завдання можуть існувати свої компоненти семантичного ядра (класи, відображення) і пов'язані онтології. У запропонованій архітектурі комбінується набір таких двійників і передбачається механізм їх узгодження (через O і T), проте сама структура (1)

загальна для всіх етапів.

Наприклад, у контексті вибору БПЛА для місії розвідки множини DT можна реалізувати як $\{UAV_1, UAV_2\}$, а відповідні цифрові двійники моделюють поточний стан живлення та зносу. Ці приклади наведені у наступному розділі 2.2.

Архітектура реалізує чотири функціональні контури:

1. Семантичний контур формує формалізовану модель знань предметної області.
2. Динамічний контур забезпечує актуалізацію стану цифрових двійників.
3. Рішеневий контур виконує оцінювання та вибір альтернатив.
4. Трасувальний контур забезпечує збереження повного контексту прийняття рішень у цифровій нитці.

Цикл функціонування архітектури задається послідовністю перетворень:

$$S(t + \Delta t) \Rightarrow O(t + \Delta t) \Rightarrow D(t + \Delta t) \Rightarrow T(t + \Delta t), \quad (2)$$

де $S(t)$ – стан цифрового двійника в момент часу t ; $O(t)$ – оновлений стан онтологічної бази знань; $D(t)$ – сформоване рішення; $T(t)$ – актуалізована цифрова нитка.

2.2. Онтологічний рівень як формальна база знань

Семантичний рівень архітектури реалізується у вигляді онтології предметної області, що формально задається множиною:

$$O = \{C, R, A, I, \Phi\}, \quad (3)$$

де C – множина класів (UAV, Mission, Constraint, Parameter, Economic Indicator); R – множина відношень між класами; A – множина атрибутів; I – множина інстансів; Φ – множина логічних правил.

До базових класів онтології належать наступні:

UAV, Mission, Requirement, Constraint, Parameter, DT_State, Decision, EconomicIndicator.

Приклад (БПЛА): нехай UAV_A та UAV_B – два безпілотники літакового типу з атрибутами Range, Endurance, Payload. Місія ReconMission має обмеження на дальність і корисне навантаження. Правила оптимізації ґрунтуються на оцінці K_4 (ймовірність успіху місії) та K_5 (економічна вартість). У цьому випадку цифрові двійники DT_A, DT_B моделюють стан кожного БПЛА, а рішення вибору пояснюється через цифрову нитку.

Обмеження формалізуються у вигляді предикатів:

$$Constraint_j : f_j(P_i) \geq \theta_j, \quad (4)$$

де $Constraint_j$ – j -те обмеження; f_j – функція перевірки параметра;

P_i – параметри i -го БПЛА; θ_j – порогове значення.

Наприклад, вимога тривалості польоту задається наступним чином:

$$Endurance(U_i) \geq 10.$$

Ключовим елементом онтології є множина логічних правил:

$$\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k\}, \quad (5)$$

де ϕ_i – i -те правило логічного виведення;

k – загальна кількість правил у базі знань.

Кожне правило має структуру імплікації:

$$\phi_i : \bigwedge_{j=1}^{m_i} \alpha_{ij} \Rightarrow \beta_i, \quad (6)$$

де α_{ij} – j -та умова; m_i – кількість умов; β_i – висновок.

Висновки формують допустимість альтернативи, коригування оцінки або ініціюють економічні перерахунки.

Множина правил може бути декомповована на підмножини:

$$Infer : (O, S(t)) \rightarrow D, \quad (7)$$

де D – множина допустимих або ранжованих альтернатив.

Семантичне узгодження параметрів цифрового двійника з онтологією забезпечується відображенням:

$$\mu : (C \times A) \rightarrow P_i, \quad (8)$$

де кожній парі «клас–атрибут» відповідає конкретний параметр цифрового двійника.

Коректність онтологічного рівня забезпечується несуперечністю, повнотою покриття вимог та ациклічністю правил.

Таким чином, онтологія виконує роль формального семантичного ядра системи, що забезпечує узгодженість, пояснюваність та відтворюваність прийнятих рішень.

2.3. Формальна модель цифрового двійника

Цифровий двійник БПЛА в межах запропонованої архітектури розглядається як динамічна математична модель, що відображає технічні параметри, експлуатаційний стан та невизначеність функціонування реального об'єкта. Формально цифровий двійник i -го БПЛА задається рівнянням:

$$DT_i = \langle P_i, S_i(t), M_i, U_i \rangle, \quad (9)$$

де P_i – множина статичних параметрів (конструктивні характеристики, номінальні показники);

$S_i(t)$ – вектор стану у момент часу t ;

M_i – сукупність математичних моделей (аеродинамічні, енергетичні, ресурсні);

U_i – множина параметрів невизначеності.

Вектор стану.

Стан цифрового двійника визначається як:

$$S_i(t) = \{p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{in}(t)\}, \quad (10)$$

де $p_{ij}(t)$ – j -й параметр стану i -го БПЛА в момент часу t .

До таких параметрів можуть належати рівень заряду батареї, ресурс вузлів, фактична дальність зв'язку, імовірність відмови тощо.

Динаміка стану.

Еволюція стану описується функцією переходу:

$$S_i(t + \Delta t) = F(S_i(t), u_i(t), \omega_i(t)), \quad (11)$$

де F – оператор переходу стану;

$u_i(t)$ – керуючі впливи;

$\omega_i(t)$ – зовнішні збурення;

Δt – часовий інтервал.

Узгодження з онтологією.

Семантична відповідність параметрів цифрового двійника онтологічним атрибутам забезпечується відображенням:

$$\mu: (C \times A) \rightarrow P_i, \quad (12)$$

де C – клас онтології;

A – атрибут класу;

P_i – параметр цифрового двійника.

Відображення гарантує однозначність інтерпретації параметрів при переході між семантичним та числовим рівнями.

2.4. Графова модель цифрової нитки

Цифрова нитка (Digital Thread) розглядається узгоджений граф, що відображає довготривалі зв'язки між даними та рішеннями протягом ЖЦВ:

$$T = (V, E, \tau_V, \tau_E), \quad (13)$$

де V – множина вузлів;

$E \subseteq V \times V$ – множина ребер;

τ_V – функція типізації вузлів;

τ_E – функція типізації ребер.

Типи вузлів:

$$V = \{Req, Model, DTState, Decision, Econ, Evidence\}, \quad (14)$$

де V – множина типів вузлів;

Req – вимоги;

Model – моделі;

DTState – стани цифрового двійника;

Decision – рішення;

Econ – економічні оцінки;

Evidence – активовані правила та обґрунтування.

Вузли типу *Decision* позначають статичні записи про прийняті рішення (зв'язані з їх контекстом і довідковими даними), а не процес ухвалення як такий.

Типи зв'язків:

$$E = \{uses, derivedFrom, causes, justifiedBy, assessedBy\}, \quad (15)$$

де E – множина типів ребер.

Наприклад, зв'язок

$$Decision \xrightarrow{uses} DTState \quad (16)$$

означає, що рішення прийняте на основі конкретного стану цифрового двійника.

Інваріант повноти трасованості.

Для кожного вузла типу *Decision* виконується:

$$\exists r, s, e : (r \rightarrow d), (d \rightarrow s), (d \rightarrow e), \tag{17}$$

що гарантує наявність повного контексту прийняття рішення.

Фрагмент цифрової нитки для одного рішення наведено на рис. 2.

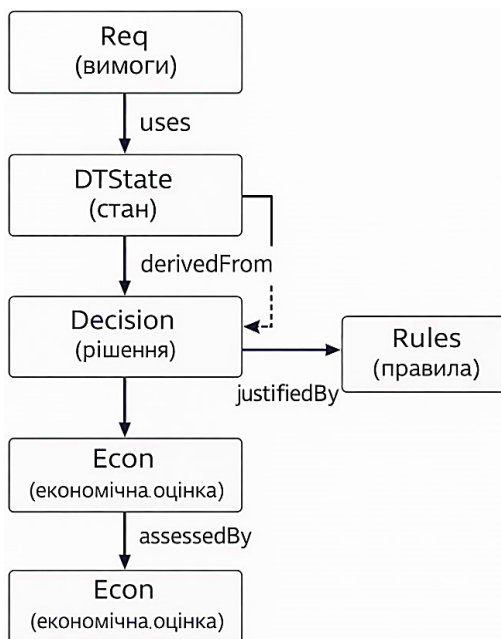


Рис. 2. Фрагмент цифрової нитки для одного рішення

Як показано на рис. 2, вузол рішення пов'язаний із відповідним станом цифрового двійника (DTState), активованими правилами (Rules) та економічною оцінкою (Econ).

2.5. Механізм трасованості та provenance

Для забезпечення пояснюваності вводиться функція трасованості:

$$\tau(d) = \{Req_d, DTState_d, Rules_d, Econ_d\}, \tag{18}$$

де d – конкретне рішення;

Req_d – множина вимог, що вплинули на рішення;

$DTState_d$ – стан цифрового двійника;

$Rules_d$ – активовані правила;

$Econ_d$ – відповідна економічна оцінка.

Мінімальний пояснювальний підграф. Визначимо мінімальний підграф пояснення:

$$\pi(d) = \arg \min_{G' \subseteq T} |G'|, \tag{19}$$

де G' – підграф цифрової нитки;

$|G'|$ – кількість його вузлів і зв'язків.

Метрика повноти пояснення:

$$Completeness(d) = \frac{|Context(d)|}{|RequiredContext|}, \quad (20)$$

де $Context(d)$ – фактичний набір контекстних елементів;

$RequiredContext$ – мінімально необхідний набір.

Якщо $Completeness(d) = 1$, рішення має повний трасувальний контекст.

Взаємодія з економічним модулем.

Економічна оцінка рішення може бути визначена наступним чином:

$$EC(U_i, t) = K_5(t) + L(1 - K_4(t)), \quad (21)$$

де $K_5(t)$ – базова вартість місії; $K_4(t)$ – імовірність успіху;

L – вартість наслідків невдачі.

Коефіцієнт імовірності успіху $K_4(t)$ визначається як:

$$K_4(t) = f(R_{sys}(t), E(t), C_{mission}), \quad (22)$$

де $R_{sys}(t)$ – надійність системи, що обчислюється через цифровий двійник

(наприклад, для послідовної структури $R_{sys} = \prod R_i$);

$E(t)$ – умови середовища (погода, завади);

$C_{mission}$ – відповідність параметрів БПЛА вимогам місії.

У даній роботі використовується спрощена модель:

$$K_4(t) \approx R_{sys}(t), \quad (23)$$

що відповідає класичній теорії надійності технічних систем.

Використані залежності (21)–(23) базуються на класичній моделі очікуваних витрат (expected cost), яка широко застосовується у теорії прийняття рішень та ризик-аналізі. У даній роботі вони адаптовані до контексту цифрового двійника шляхом введення залежності параметрів від стану $X(t)$. Отже новизна досліджень полягає не у самій формі залежності, а у її інтеграції в цифрову нитку з трасуванням provenance. Таким чином, K_4 має фізичну інтерпретацію і не є довільним параметром. Тоді, оскільки $K_4(t)$ є функцією стану $S_i(t)$, економічна оцінка безпосередньо залежить від цифрового двійника:

$$EC(U_i, t) = f(S_i(t)). \quad (24)$$

Таким чином забезпечується інтеграція економічного та технічного контурів у межах єдиної цифрової нитки.

2.6. Механізм переоцінювання та ранжування рішень

Інтеграція ОСППР із цифровими двійниками реалізується через алгоритм детермінованого перерахунку альтернатив при зміні стану цифрового двійника. Нехай у момент часу t для множини альтернатив $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ визначено стани $S_i(t)$. Тоді процедура оновлення при переході до моменту $t + \Delta t$ описується наступною послідовністю:

1. Отримання нового стану за інтегральним показником:

$$S(t + \Delta t) = F(S_i(t), u_i(t), \omega_i(t)). \quad (25)$$

Показник S_i є безрозмірною величиною, що використовується виключно для ранжування альтернатив. Він не має фізичної інтерпретації та не використовується поза процедурою вибору. До практичного застосування в цьому випадку слід віднести: вибір БПЛА з максимальним S_i ; аналіз чутливості до зміни критеріїв; повторне ранжування при зміні стану цифрового двійника.

2. Оновлення інстансів онтології через відображення:

$$\mu: (C \times A) \rightarrow P_i. \quad (26)$$

3. Перевірка обмежень:

$$Constraint_j: f_j(P_i) \geq \theta_j. \quad (27)$$

4. Обчислення інтегрального показника альтернативи:

$$Scope(U_i, t) = \sum_{j=1}^m \omega_j x'_{ij}(t), \quad (28)$$

де ω_j – ваговий коефіцієнт j -го критерію; $x'_{ij}(t)$ – нормалізоване значення;

m – кількість критеріїв.

Нормалізація для виграного критерію:

$$x'_{ij}(t) = \frac{x_{ij}(t)}{\max_i x_{ij}(t)}. \quad (29)$$

Для витратного критерію:

$$x'_{ij}(t) = \frac{\min_i x_{ij}(t)}{x_{ij}(t)}. \quad (30)$$

5. Формування нового вузла рішення у цифровій нитці:

$$Decision(t + \Delta t). \quad (31)$$

6. Перерахунок економічної оцінки виконують за рівнянням (21).

Обчислювальна складність повного циклу:

$$O(nm + |E|), \quad (32)$$

де $|E|$ – кількість ребер цифрової нитки;

n – кількість альтернатив (альтернативні БПЛА), $n = |U|$.

Алгоритм (30)–(32) формалізує переоцінювання альтернатив (ранжування) за оновленими критеріями.

2.7. Інформаційна модель обміну даними

Інформаційна модель обміну даними визначається як двонаправлене семантичне відображення між числовими параметрами цифрового двійника та онтологічними структурами:

$$\varphi: DT \rightarrow O, \psi: O \rightarrow DT. \quad (33)$$

Оператор φ виконує інтерпретацію числових параметрів (температура, ресурс, дальність) як онтологічних атрибутів, що дозволяє застосовувати логічні правила.

Оператор ψ здійснює зворотне перетворення – передає результати логічного виведення (наприклад, обмеження або коригування) у цифровий двійник.

Таким чином, модель забезпечує: семантичну узгодженість; синхронізацію стану; можливість трасування рішень. Як показано на рис. 3, інтегрована архітектура базується на двонаправленому відображенні між цифровим двійником та онтологією (φ, ψ), що забезпечує семантичну узгодженість.

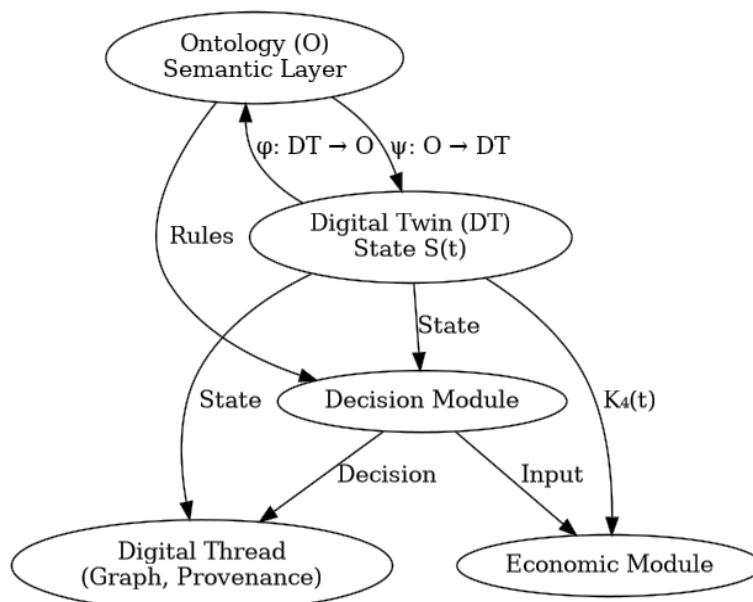


Рис. 3. Формалізована архітектура інтеграції ОСППР, цифрового двійника та цифрової нитки БПЛА

Модуль прийняття рішень використовує як параметри стану цифрового двійника, так і онтологічні правила, а результати фіксуються у цифровій нитці разом із контекстом (provenance).

Економічний модуль інтегрується в контур прийняття рішень через показник $K_4(t)$, що залежить від стану системи.

Архітектура підтримує два рівні представлення даних: семантичний (RDF/OWL) та графовий (property graph).

RDF-трійки:

`</>` Код

`<UAV_1> <hasParameter> <Endurance_12h>`

`<Decission_1> <usesState> <DTState_t0>`

`<Decission_1> <ussessedBy> <Econ_1>`

Приклад (реальний сценарій БПЛА). Розглянемо ISR-місію (Intelligence, Surveillance, Reconnaissance) з дальністю 120 км.

Для БПЛА типу літакового класу цифровий двійник формує параметри:

- рівень заряду батареї $Battery(t)$;
- деградацію двигуна $Engine_{deg}(t)$;
- фактичну дальність зв'язку $CommRange(t)$.

Через відображення $\varphi: DT \rightarrow O$ ці параметри інтерпретуються як:

- атрибут *Endurance* ;
- обмеження *MissionRange* ;
- коефіцієнт ризику відмови.

У разі зниження $Battery(t)$ нижче порогу, правило (7) активує обмеження допустимості, що призводить до виключення альтернативи з множини допустимих рішень.

Це демонструє практичну роботу архітектури саме для БПЛА, а не загальної AI-моделі.

Property graph

Розглянемо інженерний кейс: ISR-місія з дальністю 120 км, де враховано деградацію ресурсу та вплив на рішення.

Модель підтримує представлення вузлів стану, рішень та економічних оцінок із типізованими зв'язками provenance.

Це дозволяє реалізувати provenance-запити типу: «Які параметри стану вплинули на зміну рішення?»

3. Експериментальний числовий міні-кейс

Розглянемо три альтернативи БПЛА:

$$U = \{U_1, U_2, U_3\}. \quad (34)$$

Критерії:

1. Дальність (км) – вирашаний.
2. Тривалість польоту (год) – вирашаний.
3. Вантажопідйомність (кг) – вирашаний.
4. Імовірність успіху K_4 – вирашаний.
5. Вартість місії K_5 – витратний.

Ваги: $\omega = \{0.25, 0.20, 0.15, 0.25, 0.15\}$.

Після нормалізації отримано:

- $Score(U_3, t_0) = 0.95$, $Score(U_1, t_0) = 0.9129$, $Score(U_2, t_0) = 0.8852$;
- лідер U_3 .

Початкові дані сформовано як узагальнений ілюстративний приклад, що відображає типові діапазони характеристик БПЛА літакового типу (дальність 120–180 км, тривалість 10–15 год, навантаження 5–10 кг).

Прийняті дані не є результатом конкретного експерименту або конкретної моделі БПЛА і використовуються виключно для демонстрації роботи алгоритму (табл. 1).

Таблиця 1

Початкові значення (t_0)

Альтернатива	Range	Endurance	Payload	K_4	K_5
U_1	150	12	8	0.90	8
U_2	130	14	7	0.88	7
U_3	170	11	9	0.92	9

Зміна стану ДТ для $U_3(t_1)$: $K_4 \downarrow 0.75$; $K_5 \uparrow 10$.

Отримано: $Score(U_3, t_1) = 0.8732$, $EC(U_3, t_1) = 11.5$. Новий лідер: U_1 .

Зміна стану цифрового двійника призводить до автоматичного перерахунку ранжування та економічної оцінки.

4. Інтерпретація отриманих результатів

Отримані результати базуються на детермінованому алгоритмі перерахунку альтернатив (23)–(31), у якому кожна зміна стану цифрового двійника $S_i(t)$ призводить до оновлення онтологічних інстансів, перевірки обмежень і повторного обчислення інтегрального показника альтернативи, який реалізує детермінований ланцюг обчислень:

1. Фіксація нового стану цифрового двійника $X_i(t+\Delta t)X_i(t-\Delta t)X_i(t+\Delta t)$.
2. Відображення параметрів у онтологічні інстанси через оператор φ .
3. Перевірка обмежень (5).
4. Нормалізація критеріїв (26)–(27).
5. Обчислення інтегрального показника (25).
6. оновлення вузла рішення в цифровій нитці (28).

Таким чином, результат не отримано емпірично або статистично, а є прямим наслідком формалізованого алгоритмічного перерахунку у вигляді зміни ранжування альтернатив (відповідно даних п. 2.8), що отримано як прямий наслідок:

- зміни вектору стану цифрового двійника;
- перерахунку нормалізованих критеріїв;
- оновлення вагового агрегованого показника (25).

Смисл отриманого результату полягає в наступному:

1. Рішення стає функцією поточного технічного стану БПЛА, а не статичних характеристик.
2. Забезпечується адаптивність вибору альтернатив у реальному часі.
3. Економічна оцінка (20) стає узгодженою з фактичним станом системи, що знижує ризик помилкових управлінських рішень.

Таким чином, результат не є емпіричним, а є наслідком формалізованої інтеграції моделей: онтологія + цифровий двійник + цифрова нитка.

Отже отриманий результат полягає у формалізації взаємозв'язків між семантичним описом виробу, параметрами цифрового двійника та елементами цифрової нитки, що забезпечує саме цілісність, трасованість і узгодженість даних у цифровому середовищі БПЛА протягом усього ЖЦВ.

Висновки

1. Розроблено формалізовану інформаційну архітектуру інтеграції ОСППР, цифрового двійника та цифрової нитки БПЛА, що забезпечує єдине семантично узгоджене цифрове середовище.

2. Запропоновано механізм відображення онтологічних понять у параметри цифрового двійника та формалізовано модель цифрової нитки як орієнтованого типізованого графа, що дозволяє забезпечити відновлюваність контексту прийняття рішень.

3. Обґрунтовано інтеграцію економічної оцінки у цифровий контур

прийняття рішень, що створює функціональний зв'язок між технічним станом БПЛА та показниками ефективності його застосування.

4. Підтверджено можливість використання запропонованого підходу для побудови адаптивних і трасованих систем підтримки прийняття рішень у задачах вибору та експлуатації БПЛА в умовах динамічних змін параметрів середовища.

Обґрунтування висновків базується на отриманих результатах дослідження (п. 3 і 4 статті), де показано:

- зміну ранжування альтернатив при зміні стану цифрового двійника;
- формалізований механізм трасування рішень через граф цифрової нитки;
- узгодження економічної оцінки з технічним станом.

Таким чином, висновки безпосередньо впливають із формалізованих моделей і наведеного числового прикладу.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на удосконалення економічної моделі з урахуванням невизначеності та ризику, інтеграцію часової складової у цифрову нитку, адаптивне налаштування ваг критеріїв, автоматичну генерацію пояснень рішень, масштабне тестування на реальних даних та узгодження архітектури з системами MBSE і стандартами ISO цифрових двійників.

Реалізація зазначених напрямів дозволить підвищити рівень автоматизації, інтелектуалізації та економічної обґрунтованості процесів прийняття рішень у сфері застосування БПЛА.

Список літератури

1. Воробйов, Ю.А., Майорова, К.В., Попов, А.В., Д'яченко, Ю.В., Безкорвайний, В.А. Розроблення онтологічної системи підтримки прийняття рішення щодо вибору безпілотних літальних апаратів літакового типу // Наука і техніка сьогодні. – 2025. – №11(52). – С. 1944–1961. – DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1944-1961](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1944-1961).

2. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. – Geneva : ISO, 2021.

3. ISO/IEC 30173:2023. Digital twin – Use cases. – Geneva : ISO/IEC, 2023.

4. Karabulut, E., Pileggi, S. F., Groth, P., Degeler, V. Ontologies in Digital Twins: A Systematic Literature Review // Future Generation Computer Systems. – 2024. – Vol. 153. – P. 442–456. – DOI: 10.1016/j.future.2023.10.025.

5. Duverger, E., Aubry, A., Levrat, E., Arista, R. An ontology-based digital thread framework to support early concurrent engineering in the aerospace industry // Journal of Industrial Information Integration. – 2025. – DOI: 10.1016/j.jii.2025.100984.

6. Gautier, R. H., et al. Formulation of an Ontology-Based Digital Thread for Analysis and Decision Support Activities // AIAA SciTech Forum Proceedings. – 2025. – DOI: 10.2514/6.2025-1092.

7. Wu, H., Zhao, X., Li, Z. Digital thread in engineering: concept and state-of-the-art // Advanced Engineering Informatics. – 2025. – DOI: 10.1016/j.aei.2025.103258.

8. Greif, L., et al. A Knowledge Graph Framework to Support Life Cycle Integration of Engineering Data // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 15, Iss. 1. – Article No. 175. – DOI: 10.3390/app15010175.

9. Martín-Lammerding, D., Astrain, J. J., Córdoba, A., Villadangos, J. 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.

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. Insaurrealde, 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.

12. Insaurrealde, C. C., Blasch, E. Uncertainty-Driven Ontology for Decision Support System Integration // *Electronics*. – 2022. – Vol. 11, Iss. 3. – Article No. 362. – DOI: 10.3390/electronics11030362.

13. Oetl, F., Eckart, L., Schilp, J. Cost estimation approach of a digital twin implementation in industry // *Procedia CIRP*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.055.

14. Zappa, S., Franciosi, C., Polenghi, A., Voisin, A. Ontology-based Digital Twin for maintenance decisions in manufacturing systems: an application at laboratory scale // *IFAC-PapersOnLine*. – 2024. – Vol. 58, Iss. 8. – P. 13–18. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.043.

15. Pronost, G., et al. Digital Twins along the product lifecycle // *Digital Twin*. – 2024. – DOI: 10.12688/digitaltwin.17807.2.

16. Petri, I., et al. Digital twins for dynamic life cycle assessment and economic analysis // *Science of the Total Environment*. – 2025. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.175700.

17. Forward, G., et al. Digital Twin/Digital Thread Solution Definition for Aerospace & Defense. – 2022. – URL: https://www.cimdata.com/images/position-papers/ADPAG_DTDT_PP_Ph2_Rel1.0.pdf (дата звернення: 20.02.2026).

References

1. Vorobjov, Yu.A., Majorova, K.V., Popov, A.V., D'yachenko, Yu.V., Bezkorovajnij, V.A. Rozroblennya ontologichnoyi sistemi pidtrimki priynyattya rishennya shodo voboru bezpilotnih litalnih aparativ litakovogo tipu // *Nauka i tehnika sьогодni*. – 2025. – №11(52). – S. 1944–1961. – DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11\(52\)-1944-1961](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-11(52)-1944-1961).

2. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. – Geneva : ISO, 2021.

3. ISO/IEC 30173:2023. Digital twin – Use cases. – Geneva : ISO/IEC, 2023.

4. Karabulut, E., Pileggi, S. F., Groth, P., Degeler, V. Ontologies in Digital Twins: A Systematic Literature Review // *Future Generation Computer Systems*. – 2024. – Vol. 153. – P. 442–456. – DOI: 10.1016/j.future.2023.10.025.

5. Duverger, E., Aubry, A., Levrat, E., Arista, R. An ontology-based digital thread framework to support early concurrent engineering in the aerospace industry // *Journal of Industrial Information Integration*. – 2025. – DOI: 10.1016/j.jii.2025.100984.

6. Gautier, R. H., et al. Formulation of an Ontology-Based Digital Thread for Analysis and Decision Support Activities // *AIAA SciTech Forum Proceedings*. – 2025. – DOI: 10.2514/6.2025-1092.

7. Wu, H., Zhao, X., Li, Z. Digital thread in engineering: concept and state-of-the-art // *Advanced Engineering Informatics*. – 2025. – DOI:

10.1016/j.aei.2025.103258.

8. Greif, L., et al. A Knowledge Graph Framework to Support Life Cycle Integration of Engineering Data // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 15, Iss. 1. – Article No. 175. – DOI: 10.3390/app15010175.

9. Martin-Lammerding, D., Astrain, J. J., Cordoba, A., Villadangos, J. 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.

10. Martin-Lammerding, D., Astrain, J. J., Cordoba, 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. Insaurrealde, 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.

12. Insaurrealde, C. C., Blasch, E. Uncertainty-Driven Ontology for Decision Support System Integration // *Electronics*. – 2022. – Vol. 11, Iss. 3. – Article No. 362. – DOI: 10.3390/electronics11030362.

13. Oettl, F., Eckart, L., Schilp, J. Cost estimation approach of a digital twin implementation in industry // *Procedia CIRP*. – 2023. – DOI: 10.1016/j.procir.2023.06.055.

14. Zappa, S., Franciosi, C., Polenghi, A., Voisin, A. Ontology-based Digital Twin for maintenance decisions in manufacturing systems: an application at laboratory scale // *IFAC-PapersOnLine*. – 2024. – Vol. 58, Iss. 8. – P. 13–18. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.043.

15. Pronost, G., et al. Digital Twins along the product lifecycle // *Digital Twin*. – 2024. – DOI: 10.12688/digitaltwin.17807.2.

16. Petri, I., et al. Digital twins for dynamic life cycle assessment and economic analysis // *Science of the Total Environment*. – 2025. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.175700.

17. Forward, G., et al. Digital Twin/Digital Thread Solution Definition for Aerospace & Defense. – 2022. – URL: https://www.cimdata.com/images/position-papers/ADPAG_DTDT_PP_Ph2_Rel1.0.pdf (data zvernennya: 20.02.2026).

Надійшла до редакції 23.02.2026, розглянута на редколегії 10.04.2026

Integration of an Ontology-Based Decision Support System with Digital Twins and Digital Threads of UAVs for Improving Decision Traceability and Economic Assessment Accuracy

The object of this study is the integration of an ontology-based decision support system with digital twins and a digital thread of unmanned aerial vehicles (UAVs). The research addresses the problem of the absence of a formalized information architecture capable of ensuring semantic consistency, full decision traceability, and coherent integration of technical and economic assessments within a unified digital environment.

An integrated information architecture is proposed that combines a semantic ontology layer, a dynamic digital twin layer, a decision-making module, and a graph-based digital thread into a coordinated system. A formal model of the digital twin is

used to enable adaptive recalculation of alternatives when the technical state of the UAV changes. Decision traceability is achieved through the construction of a structured explanatory subgraph within the digital thread, preserving the complete context of requirements, system states, activated rules, and economic indicators.

The integration of economic evaluation directly into the digital decision loop ensures consistent updating of risk-adjusted mission cost indicators in response to state variations. The results confirm deterministic recalculation of alternatives, semantic coherence between ontology and digital twin parameters, locality of updates, and full traceability of decisions.

The proposed approach can be applied in mission planning systems, UAV fleet management, lifecycle digital platforms, and traceable decision support environments operating under dynamically changing conditions.

Key words: ontology-based decision support system; digital twin; digital thread; UAV; decision traceability; economic assessment; information architecture; lifecycle integration.

Відомості про авторів:

Воробйов Юрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Заслужений працівник освіти України, професор кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Електронна пошта: i.vorobiov@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6401-7790>.

Майорова Катерина Володимирівна – канд. техн. наук, доц., зав. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Електронна пошта: kate.majorova@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3949-0791>.

Сосунів Андрій Олексійович – аспірант кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Електронна пошта: a.sosunov@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2586-7329>.

About the authors:

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: <https://orcid.org/0000-0001-6401-7790>.

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: <https://orcid.org/0000-0003-3949-0791>.

Andriy SOSUNOV – PhD Student of the Department of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.sosunov@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2586-7329>.