

ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-2-9-123-132

УДК 629.7:338.45

Мальований Володимир Вікторович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Журід Володимир Іванович

<https://orcid.org/0000-0001-8265-3264>

Капінос Микола Семенович (кандидат наук з державного управління)

<https://orcid.org/0000-0003-3932-1381>

Яковлев Руслан Петрович

<https://orcid.org/0000-0002-3788-2583>

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна

СУЧАСНІ МЕТОДИ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Стаття присвячена комплексному дослідженню сучасних методів навігації безпілотних літальних апаратів з акцентом на їхню економічну ефективність та інвестиційну привабливість, зокрема в контексті української дрон-економіки. В умовах глобальної технологічної волатильності, посилення ризиків GNSS-джемінгу та спуфінгу, а також стрімкого зростання ринку безпілотних літальних апаратів, традиційні навігаційні системи (GNSS, INS) демонструють значні недоліки, що призводить до зниження рентабельності інвестицій (ROI) нижче 10% у зонах конфліктів. У цьому контексті гібридні навігаційні системи, що інтегрують GNSS, INS, візуальну одометрію (VO), технології одночасної локалізації та картографування (SLAM) та алгоритми штучного інтелекту, виступають ключовим інструментом подолання цих обмежень. Метою роботи є економічне обґрунтування сучасних методів навігації безпілотних літальних апаратів як інструменту підвищення інвестиційної привабливості та стимулювання розвитку дрон-економіки України. Для досягнення мети запропоновано авторську концептуальну модель економічної оптимізації, яка інтегрує технічні параметри навігаційних систем (точність позиціонування, стійкість до перешкод) з фінансово-аналітичним моделюванням (NPV, IRR, ROI, CAPEX, OPEX). Модель включає чотири взаємопов'язані модулі: сенсорну інтеграцію, фінансове моделювання, адаптивне траскторне планування та врахування регуляторних факторів. Її математичне ядро базується на скоригованому показнику чистої теперішньої вартості ($NPV\sim adj$), що враховує коефіцієнт технічної ефективності ($\eta\sim tech$). В статті проведено порівняльний аналіз основних навігаційних методів (GNSS, INS, VO, SLAM, гібридні системи), визначено їхні техніко-економічні характеристики (точність, CAPEX, OPEX, ROI) та вплив на фінансові результати. Ідентифіковано ключові ризики для українського сектору безпілотних літальних апаратів (технологічні, фінансові, регуляторні, кадрові) та запропоновано комплекс практичних рекомендацій для державної політики, спрямованих на створення інвестиційного фонду, розвиток антиджемінгових навігаційних технологій з штучним інтелектом та гармонізацію нормативної бази з європейськими стандартами. Висновки підтверджують, що гібридизація навігаційних систем трансформує їх з технічного інструменту у високорентабельний інвестиційний актив, здатний забезпечити сталий розвиток національної дрон-економіки.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, навігаційні системи, гібридна навігація, візуальна одометрія, штучний інтелект, економічна ефективність, рентабельність інвестицій

Вступ

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відбувається в умовах глобальної технологічної та економічної волатильності, коли інноваційна перевага безпосередньо визначає рівень конкурентоспроможності та економічної віддачі. Стрімке зростання ринку БПЛА, зокрема у

військово-промисловому, аграрному та логістичному секторах, супроводжується низкою системних викликів. Традиційні методи навігації – GNSS та INS демонструють високу вразливість у середовищах із джемінгом, дрейфом і низькою видимістю, що призводить до зниження ефективності місій та втрат інвестицій, які у зонах

конфліктів можуть сягати 25–30%. В українському контексті, де сектор безпілотників продемонстрував зростання на 15–18% у 2024 році, ризики посилюються впливом воєнного стану, міграцією інженерних кадрів та валютною турбулентністю. На глобальному рівні, попри прогнозований середньорічний темп зростання ринку (CAGR) близько 14%, проекти з морально застарілими навігаційними системами мають рентабельність (ROI) нижчу за 10%, що істотно знижує їх інвестиційну привабливість. У результаті формується суперечність: прогрес у сфері штучного інтелекту та сенсорних систем створює потенціал технологічного прориву, однак економічні бар'єри – високі витрати на впровадження (CAPEX/OPEX) і регуляторна фрагментація – обмежують масштаби його реалізації. Сучасні гібридні навігаційні системи, які інтегрують GNSS, INS, SLAM і алгоритми штучного інтелекту, виступають ефективним інструментом подолання цих обмежень. Вони забезпечують точність позиціонування до 0,1–0,5 м і дозволяють скоротити операційні витрати на 35–50%, що підтверджується міжнародними дослідженнями. У середньому такі рішення демонструють ROI на рівні 15–25%, що свідчить про їх високу економічну ефективність. Водночас питання комплексної економічної оцінки гібридних навігаційних систем залишається недостатньо розробленим. Нині відсутні узгоджені методики, які б інтегрували фінансово-економічні індикатори (NPV, IRR, ROI) з технічними характеристиками сенсорів, алгоритмів корекції, адаптивного планування траєкторій та регуляторних вимог. Це обумовлює необхідність створення економіко-математичного інструментарію для обґрунтування інвестицій у сучасні навігаційні технології БпЛА – критично важливого чинника забезпечення конкурентоспроможності та технологічної безпеки українського дрон-сектору у довгостроковій перспективі.

Матеріали та методи

Проблематика сучасних методів навігації безпілотних літальних апаратів (БпЛА) набуває особливої актуальності в умовах глобальної технологічної турбулентності, швидкого зростання ринку дронів та зростання ризиків, пов'язаних із GNSS-джемінгом, обмеженою видимістю й економічними витратами впровадження. Актуальні дослідження спрямовані на пошук оптимального балансу між технічною надійністю, обчислювальною ефективністю та економічною рентабельністю навігаційних систем, де інновації у сфері сенсорної інтеграції та штучного інтелекту поступово витісняють традиційні підходи.

Результати

Методи навігації БпЛА в умовах відсутності GNSS-сигналу систематизують І. Джаррайя, А. Аль-Бататі, М. Б. Кадрі та співавтори [1]. Дослідження охоплює аналіз обчислювальної складності, методологій сенсорної ф'южн і локалізації, зокрема інерційну навігацію (INS), візуальну одометрію (VO) та SLAM. Використання

фільтрів Калмана та розширені фільтри Калмана EKF (Extended Kalman Filter) дозволяє зменшити помилки позиціонування до 0,2–0,5 м і скоротити обчислювальні витрати на 40–60% порівняно з монометодними системами. Отримані результати свідчать, що гібридні підходи підвищують стійкість до дрейфу та шумів і знижують OPEX за рахунок оптимізації ресурсів, формуючи підґрунтя для подальшої економічної оцінки навігаційних технологій.

Розвиток концепції сенсорної інтеграції у контексті ройових систем простежується у праці Л. Чжана, С. Као, М. Су та Ю. Суй [2]. Автори пропонують модель колаборативної інтегрованої навігації, що поєднує розподілену ф'южн-архітектуру з алгоритмами консенсусу й машинного навчання. Емпіричні випробування з роями до 20 БпЛА засвідчують підвищення точності траєкторного планування на 50–70% і зниження енергоспоживання на 30%. Економічна частина дослідження демонструє зниження CAPEX на одиницю БпЛА та ROI 20–28%, що є релевантним для оборонних і аграрних флотів в Україні.

Поглиблений аналіз GNSS-denied методів представлено у роботі С. Чжоу та співавторів [3], які створили датасет SatLoc і запропонували ієрархічну адаптивну ф'южн-рамку для локалізації БпЛА. Результати показують точність до 0,1 м у складних умовах (туман, урбанізовані перешкоди) та підвищення обчислювальної ефективності на 35–55%. Автори підкреслюють економічні вигоди відкритих датасетів, що скорочують витрати на R&D на 25–40% і підвищують ROI до 30%, що має значення для України як ринку з обмеженими ресурсами.

Подальшу еволюцію terrain-aware підходів відображає дослідження Ф. Яо та співавтори [4]. Розроблена система terrain-weighted constraint optimization забезпечує drift-free позиціонування без IMU та з урахуванням топографії місцевості, що дає змогу зменшити OPEX на 30–50% і досягти ROI 20–25%. Для українських умов така методика є перспективною у зонах бойових дій, де GNSS-сигнал часто деградує.

Аспекти стійкості GNSS-компонентів висвітлено у технічному звіті GPSPatron [5], присвяченому вибору анти-спуфінг та анти-джемінг-технік для resilient GNSS. Застосування антенних масивів (CRPA) та AI-детекції підвищує стійкість сигналу на 60–85% при похибці < 0,5 м, знижуючи ризик втрат місій на 40–60%. Економічні вигоди оцінюються на рівні ROI 18–24%, що є вагомим аргументом для українських оборонних програм.

Дослідження Ю. Зідана, Ж. Сільви та Г. Тавреша [6] підтверджує, що комбіновані атаки GNSS-джемінгу та спуфінгу можуть призвести до втрати контролю над БпЛА, тоді як використання VO/SLAM скорочує ризики на 50–70%. Вартісна оцінка демонструє, що resilient-дизайн підвищує ROI до 30% завдяки зниженню втрат місій –

висновок, релевантний для формування стратегії стійкості українського сектору.

Економічно-регуляторні виміри навігаційних систем розкрито в роботі К. Декера та П. Чіамбаретто [7], де проаналізовано політики управління UTM в ЄС та США. Автори показують, що децентралізовані моделі UTM зменшують OPEX на 25–45% і забезпечують ROI 15–25%, проте потребують гармонізації регуляторних рамок – питання, критичне для України в контексті інтеграції з EASA та ICAO.

Систематичний огляд А. Джазайрі та співавторів [8] підтверджує, що використання гібридних навігацій у last-mile delivery зменшує OPEX на 40–60% та забезпечує ROI 20–35%, при цьому CAPEX окупається протягом 18–36 місяців. Такі висновки особливо релевантні для гуманітарної логістики й аграрного експорту України. Дослідження І. Ковальова та співавторів [9] розробляє cost-effectiveness модель транспортно-технологічних циклів ройових БпЛА для агросектору, демонструючи зниження OPEX на 30–50% і ROI 18–26%. Нарешті, Е. Філіопулу та співавтори [10] доводять економічну життєздатність Drone-as-a-Service (DaaS)-моделей з окупністю 2–4 роки та ROI 22–32%, що робить їх перспективними для українського ринку логістики.

Попри інтенсивний розвиток досліджень, більшість із них концентрується переважно на технічних аспектах, тоді як питання комплексної економічної оптимізації навігаційних систем у країнах із трансформаційною економікою залишаються недостатньо вивченими. В умовах воєнних ризиків і регуляторної фрагментації для України особливо актуальним є створення інтегрованої моделі, що поєднає міжнародний досвід сенсорної ф'южн із фінансово-інвестиційним аналізом та адаптивним траєкторним плануванням, що визначає наукову нішу та практичну значущість подальших досліджень у сфері економічної оптимізації систем навігації БпЛА.

У зв'язку із зазначеним вище метою статті є економічне обґрунтування сучасних методів навігації безпілотних літальних апаратів як інструменту підвищення інвестиційної привабливості та стимулювання розвитку дрон-економіки України. Для досягнення цієї мети пропонується розроблення концептуальної моделі економічної оптимізації, яка інтегрує технічні параметри навігаційних систем із фінансово-аналітичним моделюванням, що забезпечує комплексне оцінювання їх ефективності. Для реалізації поставленої мети передбачено виконання таких наукових завдань:

1. Провести порівняльний економічний аналіз основних методів навігації БпЛА з урахуванням показників капітальних та операційних витрат, рентабельності інвестицій і ризиків функціонування в умовах обмеженої видимості, джемінгу та дрейфу.

2. Оцінити економічну ефективність гібридних навігаційних систем, через моделювання впливу

підвищеної точності позиціонування на ключові фінансові параметри підприємств-розробників та користувачів.

3. Розробити авторську концептуальну модель економічної оптимізації навігації БпЛА.

4. Проаналізувати практичні кейси впровадження сучасних навігаційних рішень, для емпіричної валідації ринкової ефективності, виявлення специфічних бар'єрів і визначення потенційних напрямів масштабування.

5. Ідентифікувати ключові ризики та бар'єри інвестування в український сектор БпЛА, із формуванням аналітичної бази для подальшої розробки державних і корпоративних стратегій їх мінімізації.

6. Сформулювати практичні рекомендації щодо державної політики, інвестиційних програм і стимулів для приватного сектору, спрямованих на подолання ідентифікованих бар'єрів, гармонізацію нормативного середовища з європейськими стандартами.

Сучасний ландшафт навігаційних систем безпілотних літальних апаратів формується під впливом швидкої технологічної еволюції та економічної турбулентності глобального ринку. За прогнозами аналітичних звітів, його обсяг досягне десятків мільярдів доларів до кінця 2020-х років із середньорічним темпом зростання (CAGR) 15–18% [1, 8]. Навігаційні технології відіграють визначальну роль у забезпеченні точності, стійкості та рентабельності операцій. Ключові методи – глобальна навігаційна супутникова система (GNSS), інерційна навігаційна система (INS), візуальна одометрія (VO) та одночасна локалізація й картографування (SLAM) – еволюціонують від монометодних до гібридних рішень, що інтегрують алгоритми штучного інтелекту для стабільної роботи у GNSS-denied середовищах [1, 3].

Аналіз цих технологій охоплює як технічну, так і економічну площину – капітальні витрати (CAPEX), операційні (OPEX), профілі ризику та прибутковості (ROI). Традиційні системи виявляють високу вразливість у зонах джемінгу та дрейфу, що зумовлює зростання OPEX та втрати інвестицій [5, 6]. Для України, де ринок БпЛА у 2024 р. зріс на 15–18% [14], гібридні навігаційні рішення забезпечують ROI на рівні 18–25% в аграрному та оборонному секторах попри фінансові й експортні бар'єри.

GNSS є основою глобального позиціонування (точність 1–5 м за рахунок GPS, GLONASS, Galileo) [1]. CAPEX середньої системи становить 500–2000 дол. США (антени, приймачі), OPEX – 100–300 дол. США на рік (обслуговування, RTK-корекції). Система економічно вигідна в стабільних умовах (ROI 15–20%), але вразлива до джемінгу й спуфінгу, де втрати можуть перевищувати кілька тисяч доларів за інцидент [6]. Використання low-cost GNSS-модулів (u-blox NEO-M8) знижує CAPEX до 50–150 дол. США і забезпечує точність 2–3 м у відкритих зонах, проте похибка multipath в урбанізованих умовах сягає 5–10 м [11, 12].

INS базується на акселерометрах і гіроскопах для автономного обчислення позиції з точністю 0,05–1°/год без зовнішніх сигналів [2]. Це система з високою стійкістю до джемінгу та оновленням до 100 Гц, однак ризик дрейфу зумовлює накопичення помилок до кількох кілометрів за годину, підвищуючи OPEX на 40–60% через потребу в корекції [4]. ROI становить 12–18% у коротких місіях, але зменшується в довготривалих через накопичення похибок.

Візуальна одометрія (VO) здійснює оцінку руху через послідовний аналіз зображень і досягає точності 0,5–2% від дистанції [1]. CAPEX – 800–3000 дол. США (камери, процесори), OPEX – 150–400 дол. США/рік [8]. Недолік – чутливість до освітлення та текстури, що в темряві підвищує помилки до 50% [6]. ROI 16–22% у урбан-доставках, але потребує гібридизації для стабільності.

SLAM поєднує VO та картографування, досягаючи точності 0,1–0,5 м у динамічних середовищах [3]. CAPEX – 1500–6000 дол. США

(LiDAR/камери, GPU), OPEX – 300–700 дол. США/рік [3]. Ризики пов'язані з накопиченням дрейфу та сезонною деградацією (до 40%) [4]. ROI – 18–25%, але високі початкові витрати обмежують масове використання. Інтеграція LiDAR з GNSS/INS через EKF забезпечує точність 0,3–0,5 м у GNSS-challenging зонах і знижує OPEX на 20–40% [11].

Інтегровані архітектури LDF-Nav, що використовують RPCA та Transformer-модельовання, досягають точності 0,1–0,2 м за наявності до 40% аномальних даних, зменшуючи OPEX на $\approx 20\%$ [13]. Такі рішення дозволяють підвищити стійкість до перешкод на 25–30% порівняно з традиційними EKF-схемами та формують новий рівень економічної ефективності.

Для наочного порівняння технічних характеристик і витратних параметрів систем у різних сценаріях застосування (стабільні умови та GNSS-denied середовища) у табл. 1 подано узагальнені результати порівняльного аналізу.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз навігаційних методів БпЛА

Метод	Точність (м)	CAPEX (\$)	OPEX (\$/рік)	Основний ризик	ROI (стабільні умови),%	ROI (GNSS-denied),%
GNSS	1–5	500–2000	100–300	Джемінг, спуфінг	15–20	< 10
Low-cost GNSS	1–3	50–200	50–150	Multipath (5–10 м в урбані)	18–25	5–12
INS	0,05–1°/год	1000–5000	200–500	Дрейф	12–18	8–12
VO	0,5–2 % від дистанції	800–3000	150–400	Освітлення, текстура	16–22	10–15
SLAM	0,1–0,5	1500–6000	300–700	Дрейф без loop closure	18–25	15–20
LDF-Nav (RPCA + Transformer)	0,1–0,2	2000–8000	250–600	До 40% аномальних даних	20–28	17–24

Джерело: узагальнено автором на основі [1–14]

Обговорення

Як показує табл. 1, монометодні системи (GNSS чи INS) демонструють найнижчий показник ROI у нестабільних умовах через високу вразливість до зовнішніх факторів. GNSS забезпечує дешеве глобальне позиціонування (точність 1–5 м), але схильне до джемінгу та спуфінгу, що призводить до втрат інвестицій та збільшення OPEX на 20–30% через необхідність резервного контролю [5, 6]. Low-cost GNSS зменшує CAPEX у 10 разів, але в урбанізованих зонах його похибка зростає до 5–10 м [12].

INS є більш стійкою до перешкод, однак накопичення дрейфу призводить до збільшення витрат на калібрування та зниження ROI до 12–18%. VO та SLAM забезпечують високу локальну точність, але залежать від умов освітлення та текстурності, а SLAM-системи вимагають високої обчислювальної потужності

(GPU/LiDAR) [3, 4]. У результаті їхній CAPEX вищий на 20–30%, що знижує інвестиційну привабливість для малих операторів.

Гібридні архітектури (на базі EKF чи AI-fusion) дозволяють досягти компромісу між вартістю та надійністю. Зокрема, інтеграція LiDAR з GNSS/INS забезпечує точність 0,3–0,5 м у GNSS-challenging зонах та знижує OPEX на 20–40% [11]. Системи LDF-Nav з використанням RPCA та Transformer-моделей підвищують стійкість до аномалій на 25–30% і зменшують енерговитрати в реальному часі [13]. Таким чином, комбінація GNSS/INS з VO або SLAM дозволяє досягти ROI 18–30% у різних галузях – від аграрного сектору до логістики та оборони.

Для українського ринку, де у 2024 р. зростання індустрії БпЛА становило 15–18% [14], саме гібридні навігаційні системи стають основою підвищення інвестиційної привабливості та

експортного потенціалу. Вони дозволяють збалансувати високий CAPEX розподілом у ройових операціях та зниженням OPEX завдяки оптимізації ресурсів і штучному інтелекту. Це створює передумови для перетворення українського дрон-сектору на повноцінний високотехнологічний кластер з ROI 18–25% у базових галузях.

Гібридні навігаційні системи БпЛА, що інтегрують глобальні навігаційні супутникові системи з інерціальними навігаційними системами, візуальною одометрією, технологіями одночасної локалізації та картографування і корекцією на основі штучного інтелекту, поступово витісняють монометодні рішення. Їхня ключова перевага – стійке позиціонування у GNSS-denied середовищах (під джемінгом, спуфінгом, у міських каньйонах чи лісах) з точністю 0,1–0,5 м і зменшенням операційних витрат на 60–80% [15, 16].

Федеративна архітектура таких систем поєднує локальні розширені фільтри Калмана (EKF) з глобальним координатором, що здійснює адаптивне злиття даних від кількох сенсорів. Це забезпечує підвищення стійкості до перешкод на 30–50% та скорочення часу відновлення після збоїв до 0,1–0,3 с [17]. Еволюція від аналітичних методів фільтрації (EKF, UKF, графова оптимізація) до алгоритмів глибокого й підкріплювального навчання дозволила реалізувати динамічну адаптацію ваг вимірювань і зменшити похибки INS та GNSS у реальному часі.

Основою гібридної навігації є EKF, який описує нелінійну динаміку руху через етапи прогнозу та корекції стану. Вектор стану БпЛА

$$x_k = [p, v, q, b_a, b_g]^T, \quad (1)$$

(позиція, швидкість, орієнтація, зсув акселерометра та гіроскопа) прогнозується за INS-даними:

$$x_k^- = f(x_{k-1}, u_k), P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k, \quad (2)$$

де f – нелінійна модель руху;
 F_k – якобіан;
 Q_k – коваріаційна матриця шуму процесу.

Корекція відбувається за вимірюваннями GNSS, VO чи SLAM:

$$K_k = P_k - H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (3)$$

$$x_k = x_k^- + K_k (z_k - h(x_k^-)),$$

де H_k – матриця спостережень
 R_k – матриця шуму вимірювань [11, 15].

Методи злиття, підсилені ШІ, динамічно адаптують R_k і зменшують дрейф INS на 70–85% та ефект multipath у GNSS на 50–70%, перевищуючи класичний EKF за точністю на 15–25% [15]. Підходи на основі навчання з підкріпленням або Transformer-архітектур забезпечують адаптивне виділення ознак із мультимодальних даних (LiDAR, оптичних, WiFi), підвищуючи стійкість системи на 20–40% у складних сценаріях [16]. Федеративне злиття дозволяє ізолювати збої

окремих сенсорів, знижуючи ризик системної відмови на 40–60% і операційні витрати (OPEX) на 15–25% завдяки модульності [17].

Останні дослідження також підкреслюють потенціал інтеграції низькоорбітальних систем позиціонування, навігації й часу (LEO-PNT) із мультимодальним ф'южнгом, що зменшує залежність від середньоорбітальних GNSS на 50–70% і забезпечує субдециметрову точність у відкритих і міських зонах [18]. У результаті INS-дрейф зменшується на 70–80%, а стійкість позиціонування зростає навіть у середовищах із потужними радіоперешкодами.

З економічного погляду гібридні навігаційні рішення демонструють зниження капітальних витрат (CAPEX) на 20–30% порівняно з монометодними системами, оскільки використовують низьковартісні сенсори (GNSS-модулі 50–200 дол. США + MEMS-INS 500–1000 дол. США). Операційні витрати (OPEX) знижуються на 40–60% завдяки меншій частоті калібрувань і скороченню простоїв [10, 12]. Інтеграція LEO-PNT з resilient-ф'южнгом підвищує рентабельність інвестицій (ROI) на 7–12% у оборонному та аграрному секторах завдяки скороченню простоїв до 80% і забезпеченню навігаційної цілісності понад 99,9% [18].

Федеративне злиття даних зменшує простої критичних місій на 50–70%, що підвищує ROI на 5–7% завдяки ізоляції відмов сенсорів [17]. Перехід до моделей навчання з глибоким підкріпленням, скорочує обчислювальні витрати на 25–35%, забезпечуючи додаткове зростання ROI на 4–6% через end-to-end оптимізацію [16]. У ройових операціях, де капітальні витрати розподіляються між кількома апаратами, ROI сягає 22–28% в аграрному секторі (точне обприскування) та 18–25% в оборонному секторі (розвідка в зонах джемінгу) [9, 14].

Додаткове підвищення ефективності на 3–5% забезпечують ШІ-алгоритми адаптивної оптимізації, що скорочують енергоспоживання та час обробки на 20–30% [15].

Рентабельність інвестицій (ROI) розраховується за формулою:

$$ROI = \frac{\sum(Revenue - OPEX) - CAPEX}{CAPEX} 100\%, \quad (4)$$

де Revenue зростає на 50–70% завдяки підвищенню продуктивності (менше втрат врожаю чи місій), а OPEX зменшується на 60–80% через оптимізацію ресурсів і скорочення простоїв [9].

В українському контексті гібридні системи з EKF та ШІ-корекцією демонструють ROI 20–30%, що робить їх привабливим інвестиційним активом навіть за умов валютної турбулентності та експортних обмежень [14].

Як показано в табл. 2, із підвищенням рівня інтеграції сенсорів і впровадженням ШІ-корекції відбувається експоненційне зростання точності при помірному зростанні капітальних витрат.

Економіко-технічний аналіз гібридних навігаційних систем

Конфігурація	Точність (м)	CAPEX (\$/од.)	OPEX (\$/рік)	Зниження втрат (%)	ROI (%)
GNSS/INS	0,5–1,0	1500–3000	200–400	40–60	15–20
GNSS/INS + VO	0,3–0,7	2000–4000	250–500	50–70	18–23
GNSS/INS + SLAM (EKF)	0,1–0,5	2500–6000	300–600	60–80	20–25
GNSS/INS + AI Fusion	0,05–0,3	2800–7000	220–550	70–90	23–30
Multi-Sensor Learning Fusion	0,05–0,2	3000–8500	200–500	80–95	25–32
Hybrid Federated Fusion	0,08–0,4	3200–9000	180–480	85–98	27–35
LEO-PNT + Multi-Sensor Fusion	0,03–0,2	4000–12000	120–400	90–97	30–35
LDF-Nav (RPCA + Transformer)	< 0,1	3000–8000	250–550	70–85	22–28

Джерело: складено автором на основі мета аналізу джерел[1, 3, 9–18].

Перехід від GNSS/INS до AI-fusion або Multi-Sensor Learning Fusion зменшує втрати місій у 1,5–2 рази та збільшує ROI з 15–20% до 25–32%. LEO-PNT-сценарії, що передбачають використання низькоорбітальних супутників і мультимодального ф'южну, демонструють найвищу рентабельність (до 35%), поєднуючи технічну надійність і економічну ефективність.

Гібридні навігаційні системи з EKF та III-корекцією трансформують навігацію БПЛА з технічного інструменту в високорентабельний інвестиційний актив, який забезпечує стабільність і стійкість капіталовкладень навіть у волатильних умовах українського ринку.

Концептуальна модель економічної оптимізації навігаційних систем БПЛА базується на інтеграції технічних і фінансових параметрів у єдину систему оцінювання ефективності. Вона структурована навколо чотирьох взаємопов'язаних модулів:

Сенсорна інтеграція – об'єднання даних GNSS, INS, VO та SLAM із використанням розширеного фільтра Калмана (EKF) і алгоритмів штучного інтелекту для підвищення точності позиціонування до 0,1–0,5 м.

Фінансове моделювання – розрахунок NPV, IRR та ROI з урахуванням CAPEX/OPEX і впливу технологічних параметрів на прибутковість.

Адаптивне траєкторне планування – застосування алгоритмів динамічної оптимізації маршрутів для зниження простоїв на 50–70% унаслідок ризиків джемінгу або інерційного дрейфу.

Регуляторні фактори – врахування вимог ICAO, EASA та національних стандартів для мінімізації правових бар'єрів впровадження.

Математичне ядро моделі представлено скоригованим показником чистої теперішньої вартості:

$$NPVadj = \sum_{t=1}^n \frac{(CF_t \times \eta_{tech})}{(1+r)^t} - CAPEX, \quad (5)$$

де η_{tech} – коефіцієнт технічної ефективності, що відображає підвищення точності навігації, рівень відмовостійкості (зменшення ризиків на 40–60%) [19] і скорочення

операційних витрат на 35–50% [20].

Завдяки такій структурі модель дозволяє порівнювати інвестиційні проекти не лише за фінансовими показниками (ROI 15–30%), а й за технологічною надійністю, що забезпечує комплексну оцінку ефективності в умовах високої волатильності, коли класичні фінансові моделі не враховують вплив сенсорних інновацій на довгострокову стійкість [21].

Практична перевірка здійснюється на основі емпіричних даних. Для DJI Mavic 3 Enterprise, що використовує гібридну навігацію GNSS/INS з візуальною (VO) та SLAM-корекцією, зафіксовано $ROI \approx 22\%$ при економії 25% робочого часу та точності 0,2–0,5 м у GNSS-denied зонах; термін окупності CAPEX становить близько 1,5 року [13, 22]. В українських умовах, за даними KSE Bravel (2024 р.), аграрні дрони демонструють ROI 24–27% завдяки оптимізації процесів обприскування та зниженню OPEX на 40% [23, 24]; оборонні моделі – 18–22%, із підвищеною стійкістю до джемінгу; сумарний внесок галузі у ВВП оцінюється в 0,4–0,6%. Зазначені результати підтверджують ефективність моделі $NPVadj$: підвищення η_{tech} додає 5–10% до розрахункової прибутковості, а використання гібридних рішень забезпечує ROI у діапазоні 18–30% [24–27].

Незважаючи на динаміку зростання, сектор БПЛА в Україні залишається вразливим до низки ризиків, згрупованих за чотирма категоріями (табл. 3).

Подальший розвиток дрон-економіки України базується на концепції трансформації галузі у високотехнологічний кластер з орієнтацією на експорт та інновації [21, 23, 26]. Рекомендовано три вектори державної та приватної політики:

Інституційний напрям – створення DroneTech Investment Fund (спільна ініціатива Bravel та Мінцифри) для підтримки проєктів з $ROI > 20\%$ та залучення інвестицій обсягом до 500 млн. дол. США [14, 24].

Технологічний напрям – запуск національної програми Anti-Jamming AI Navigation з бюджетом 100–200 млн. дол. США для розвитку гібридних навігаційних систем із $\eta_{tech} > 0,85$, включно з

Ключові ризики інвестування в сектор БПЛА та їх вплив на RO

Код ризику	Опис	Потенційний ефект на ROI
R1 (Технологічний)	Джемінг/спуфінг GNSS, відсутність LEO-PNT інфраструктури [19, 25]	Зниження на 10–15% через втрати місій
R2 (Фінансовий)	Високий CAPEX (\$1500–6000) та нестача довгострокового фінансування [20]	Зниження на 8–12% через затримки впровадження
R3 (Регуляторний)	Розрив стандартів FAA/EASA та ДАСУ, затримка сертифікації на 6–12 місяців [21, 23, 26]	Зниження на 5–10% через витрати на адаптацію
R4 (Кадровий)	Відтік фахівців (15–20% щорічно) та нестача інжинірингових центрів [14, 27]	Зниження на 7–10% через уповільнення інновацій

Джерело: складено автором на основі [5, 6, 14, 19–27]

LEO-PNT та земними C-PNT технологіями на зразок NextNav TerraPoiNT, що забезпечують стійкість у GNSS-denied середовищах [19, 20, 25].

Регуляторний напрям – гармонізація національних правил з вимогами EASA та впровадження sandbox-моделі тестування для прискорення сертифікації на $\approx 40\%$, з урахуванням U-space та вимог кібербезпеки для операцій БПЛА [20, 23, 26].

За умови реалізації зазначених заходів очікується зростання ринку на 25–30% CAGR до 2030 р., збільшення внеску галузі у ВВП до 5–8 млрд USD та збереження середнього ROI на рівні 20–30% [19–27].

Висновки

Проведене дослідження підтвердило, що гібридизація навігаційних систем БПЛА – поєднання GNSS, INS, VO, SLAM та алгоритмів штучного інтелекту – має не лише технічну, а й виражену економічну доцільність. Розроблена концептуальна модель економічної оптимізації NPVadj доводить, що врахування технічного коефіцієнта ефективності η_{tech} у фінансових розрахунках дозволяє адекватно оцінювати реальну прибутковість інвестицій у високотехнологічні системи навігації. Емпіричні дані підтверджують, що гібридні рішення забезпечують ROI 18–30%, знижують операційні витрати на 40–60% та підвищують точність позиціонування до субдециметрового рівня, що формує передумови для розвитку економіки дронів як самостійного сектору.

Для України дрон-економіка перетворюється на стратегічний напрямок цифрової індустріалізації, який поєднує оборонні, аграрні та IT-компоненти. Запропоновані інституційні (створення DroneTech Investment Fund), технологічні (програма Anti-Jamming AI Navigation) та регуляторні (гармонізація з EASA та впровадження sandbox-моделей) заходи створюють системну рамку для масштабування ринку. Реалізація цих ініціатив здатна забезпечити зростання галузі і підвищити внесок сектору у ВВП.

Отже, дрон-економіка постає як одна з найдинамічніших сфер національної інноваційної екосистеми, де інтеграція сенсорних технологій та фінансового моделювання стає ключем до підвищення конкурентоспроможності України у глобальному технологічному просторі.

Список використаних джерел

- Jaraya I., Al-Batati A., Kadri M. B. та ін. GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satell Navig.* 2025. Vol. 6, no. 9. DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z.
- Zhang L., Cao X., Su M., Sui Y. Collaborative Integrated Navigation for Unmanned Aerial Vehicle Swarms Under Multiple Uncertainties. *Sensors.* 2025. Vol. 25, no. 3. P. 617. DOI: 10.3390/s25030617.
- Zhou X., Zhang X., Yang X., Zhao J., Liu Z., Shuang F. Towards UAV Localization in GNSS-Denied Environments: The SatLoc Dataset and a Hierarchical Adaptive Fusion Framework. *Remote Sensing.* 2025. Vol. 17, no. 17. P. 3048. DOI: 10.3390/rs17173048.
- Yao F., Lan C., Wang L., Wan H., Gao T., Wei Z. GNSS-denied geolocalization of UAVs using terrain-weighted constraint optimization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2024. Vol. 135. P. 104277. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104277.
- GPSPatron. Selecting Optimal Anti-Spoofing and Anti-Jamming Techniques for Resilient GNSS. GPSPatron Technical Report. 2024. URL: <https://gpspatron.com/wp-content/uploads/2024/05/Selecting-Optimal-Anti-Spoofing-and-Anti-Jamming-Techniques-for-Resilient-GNSS.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
- Zidane Y., Silva J., Tavares G. Jamming and Spoofing Techniques for Drone Neutralization: An Experimental Study. *Drones.* 2024. Vol. 8, no. 12. P. 743. DOI: 10.3390/drones8120743.
- Decker C., Chiambaretto P. Economic policy choices and trade-offs for Unmanned aircraft systems Traffic Management (UTM): Insights from Europe and the United States. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2022. Vol. 157. P. 40–58. DOI: 10.1016/j.tra.2022.01.006.
- Jazairy A., Persson E., Brho M., von Haartman R., Hilletoft P. Drones in last-mile delivery: a systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management.* 2025. Vol. 36, no. 7. P. 1–62. DOI: 10.1108/IJLM-04-2023-0149.
- Kovalev I., Kovalev D., Astanakulov K., Podoplelova V., Voroshilova A., Shaporova Z. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs. *E3S Web of Conferences.* 2024. Vol. 471. P. 04017. DOI: 10.1051/e3sconf/202447104017.
- Filiopoulou E., Bardaki C., Nikolaidou M., Michalakelis C. Drone-as-a-Service for last-mile delivery: Evidence of economic viability. *Economics of Transportation.* 2025. Vol. 41. P. 100398. DOI: 10.1016/j.ecotra.2025.100398.
- Elamin A., Abdelaziz N., El-Rabbany A. A GNSS/INS/LiDAR Integration Scheme for UAV-Based Navigation in GNSS-Challenging Environments. *Sensors.* 2022. Vol. 22, no. 24. P. 9908. DOI: 10.3390/s22249908.
- Hamza V., Stopar B., Sterle O. та ін. Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a

- review. GPS Solutions. 2024. Vol. 28, no. 149. DOI: 10.1007/s10291-024-01686-8.
13. Wang A., Guo Y., Chen H. Sensor data fusion optimization in UAV integrated navigation based on matrix factorization. *Array*. 2025. Vol. 28. P. 100524. DOI: 10.1016/j.array.2025.100524.
14. Bilousova O., Omelchenko E., Makarchuk M., Mylovanov T. Ukraine's Drones Industry: Investments and Product Innovations. KSE Institute & Brave1. 2024. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/241004-Brave1-report-v.1.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
15. Tarek M., Zahran S., Oda E., Nafea S. Integrated INS/GNSS Navigation Systems: A Comprehensive Review of Filtering and AI-Based Fusion Techniques. *Suez Canal Engineering, Energy and Environmental Science*. 2025. Vol. 3. P. 17–30. DOI: 10.21608/sceee.2025.378670.1076.
16. Zhuang Y., Sun X., Li Y. та ін. Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion*. 2023. Vol. 95. P. 62–90. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.01.025.
17. Negru S. A., Geragersian P., Petrunin I., Guo W. Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 3. P. 981. DOI: 10.3390/s24030981.
18. NAVigation innovation support programme Advisory Committee (NAVAC). PNT Vision 2035 White Paper. European Space Agency. 2024. URL: <https://navisp.esa.int/uploads/files/documents/NAVAC%20White%20Paper%20May%202024.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
19. National Telecommunications and Information Administration (NTIA). Inventory of Complementary, Alternative, and Augmentative PNT Solutions. U.S. Department of Commerce. 2025. URL: <https://www.ntia.gov/sites/default/files/2025-05/inventory-of-pnt-solutions.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
20. U.S. Department of Transportation (DOT). Complementary Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Action Plan. 2023. URL: https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2023-09/DOT%20Complementary%20PNT%20Action%20Plan_Final.pdf (дата звернення: 03.11.2025).
21. Nafar N., Fatemi M., Rezaei-Moghaddam K. Smart drone in sustainable agriculture: Evaluating four predictive models for technology adoption in Iran. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2025. DOI: 10.1016/j.iaia.2025.100594.
22. My Surveying Direct. ROI with DJI Enterprise. 2025. URL: https://www.mysurveyingdirect.com/blogs/surveying/roi-with-dji-enterprise?srltid=AfmBOooJgB6pxju5c26El9EQwo_1aH5KNorpM9UTi6Nbwn3egvKdyECx (дата звернення: 03.11.2025).
23. Panigati T., Zini M., Striccoli D. та ін. Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. *Automation in Construction*. 2025. Vol. 173. P. 106101. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106101.
24. European Economic and Social Committee (EESC). Opinion on 'Drone strategy 2.0' (Own-initiative opinion) (C/2023/858). Official Journal of the European Union, C series. 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023IE1646> (дата звернення: 03.11.2025).
25. DroneUA. Участь DroneUA в UCAB Agrotechnology 2024. 2024. URL: <https://drone.ua/blogs/news/droneua-participation-in-ucab-agrotechnology-2024> (дата звернення: 03.11.2025).
26. Bonenberg L., Motella B., Paonni M., Fortuny Guasch J. An Assessment of the Future EU Complementary Position Navigation Time (C-PNT) Ecosystem. JRC Technical Report, EUR 31899 EN, Joint Research Centre, European Commission, Luxembourg. 2024. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/681671> (дата звернення: 03.11.2025).
27. Lendon B. Ukraine's drone defense tech industry is booming amid warfare with Russia. *Business Insider*. 2025. URL: <https://www.businessinsider.com/ukraine-drone-defense-tech-industry-warfare-russia-attacks-2025-4> (дата звернення: 03.11.2025).

Volodymyr Malovanyi (candidate of technical sciences)

<https://orcid.org/0009-0003-4900-4272>

Volodymyr Zhurid

<https://orcid.org/0000-0001-8265-3264>

Mykola Kapinos (candidate of sciences in public administration)

<https://orcid.org/0000-0003-3932-1381>

Ruslan Yakovliev

<https://orcid.org/0000-0002-3788-2583>

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine

MODERN METHODS OF NAVIGATION FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

The article is dedicated to a comprehensive study of modern navigation methods for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), focusing on their economic efficiency and investment attractiveness, particularly in the context of the Ukrainian drone economy. In the face of global technological volatility, increased risks of GNSS jamming and spoofing, and the rapid growth of the UAV market, traditional navigation systems (GNSS, INS) reveal significant shortcomings, leading to a decrease in Return on Investment (ROI) below 10% in conflict zones. In the

face of global technological volatility, increased risks of GNSS jamming and spoofing, and the rapid growth of the UAV market, traditional navigation systems (GNSS, INS) reveal significant shortcomings, leading to a decrease in Return on Investment (ROI) below 10% in conflict zones. In this context, hybrid navigation systems that integrate GNSS, INS, Visual Odometry (VO), Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technologies, and Artificial Intelligence (AI) algorithms emerge as a key tool for overcoming these limitations. The aim of the work is to provide an economic rationale for modern UAV navigation methods as a tool for enhancing investment attractiveness and stimulating the development of Ukraine's drone economy. To achieve this goal, an original conceptual model of economic optimization is proposed, integrating the technical parameters of navigation systems (positioning accuracy, interference resilience) with financial-analytical modeling (NPV, IRR, ROI, CAPEX, OPEX). The model comprises four interconnected modules: sensor integration, financial modeling, adaptive trajectory planning, and consideration of regulatory factors. Its mathematical core is based on an adjusted Net Present Value indicator (NPV_{adj}), which incorporates a technical efficiency coefficient (η_{tech}). The article provides a comparative analysis of the main navigation methods (GNSS, INS, VO, SLAM, hybrid systems), determines their techno-economic characteristics (accuracy, CAPEX, OPEX, ROI), and assesses their impact on financial performance. Key risks for the Ukrainian UAV sector (technological, financial, regulatory, personnel) are identified, and a set of practical recommendations for public policy is proposed, aimed at creating an investment fund, developing anti-jamming AI navigation technologies, and harmonizing the regulatory framework with European standards. The conclusions confirm that the hybridization of navigation systems transforms them from a technical tool into a highly profitable investment asset capable of ensuring the sustainable development of the national drone economy.

Key words: Unmanned Aerial Vehicles, navigation systems, hybrid navigation, visual odometry, artificial intelligence, economic efficiency, Return on Investment.

Список використаних джерел

1. Jarraya I., Al-Batati A., Kadri M. B. та ін. GNSS-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satell Navig.* 2025. Vol. 6, no. 9. DOI: 10.1186/s43020-025-00162-z.
2. Zhang L., Cao X., Su M., Sui Y. Collaborative Integrated Navigation for Unmanned Aerial Vehicle Swarms Under Multiple Uncertainties. *Sensors.* 2025. Vol. 25, no. 3. P. 617. DOI: 10.3390/s25030617.
3. Zhou X., Zhang X., Yang X., Zhao J., Liu Z., Shuang F. Towards UAV Localization in GNSS-Denied Environments: The SatLoc Dataset and a Hierarchical Adaptive Fusion Framework. *Remote Sensing.* 2025. Vol. 17, no. 17. P. 3048. DOI: 10.3390/rs17173048.
4. Yao F., Lan C., Wang L., Wan H., Gao T., Wei Z. GNSS-denied geolocalization of UAVs using terrain-weighted constraint optimization. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2024. Vol. 135. P. 104277. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104277.
5. GPSPatron. Selecting Optimal Anti-Spoofing and Anti-Jamming Techniques for Resilient GNSS. GPSPatron Technical Report. 2024. URL: <https://gpspatron.com/wp-content/uploads/2024/05/Selecting-Optimal-Anti-Spoofing-and-Anti-Jamming-Techniques-for-Resilient-GNSS.pdf> (date of application: 03.11.2025).
6. Zidane Y., Silva J., Tavares G. Jamming and Spoofing Techniques for Drone Neutralization: An Experimental Study. *Drones.* 2024. Vol. 8, no. 12. P. 743. DOI: 10.3390/drones8120743.
7. Decker C., Chiambaretto P. Economic policy choices and trade-offs for Unmanned aircraft systems Traffic Management (UTM): Insights from Europe and the United States. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 2022. Vol. 157. P. 40–58. DOI: 10.1016/j.tra.2022.01.006.
8. Jazairy A., Persson E., Brho M., von Haartman R., Hilletoft P. Drones in last-mile delivery: a systematic literature review from a logistics management perspective. *The International Journal of Logistics Management.* 2025. Vol. 36, no. 7. P. 1–62. DOI: 10.1108/IJLM-04-2023-0149.
9. Kovalev I., Kovalev D., Astanakulov K., Podoplelova V., Voroshilova A., Shaporova Z. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs. *E3S Web of Conferences.* 2024. Vol. 471. P. 04017. DOI: 10.1051/e3sconf/202447104017.
10. Filiopoulou E., Bardaki C., Nikolaidou M., Michalakelis C. Drone-as-a-Service for last-mile delivery: Evidence of economic viability. *Economics of Transportation.* 2025. Vol. 41. P. 100398. DOI: 10.1016/j.ecotra.2025.100398.
11. Elamin A., Abdelaziz N., El-Rabbany A. A GNSS/INS/LiDAR Integration Scheme for UAV-Based Navigation in GNSS-Challenging Environments. *Sensors.* 2022. Vol. 22, no. 24. P. 9908. DOI: 10.3390/s22249908.
12. Hamza V., Stopar B., Sterle O. та ін. Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a review. *GPS Solutions.* 2024. Vol. 28, no. 149. DOI: 10.1007/s10291-024-01686-8.
13. Wang A., Guo Y., Chen H. Sensor data fusion optimization in UAV integrated navigation based on matrix factorization. *Array.* 2025. Vol. 28. P. 100524. DOI: 10.1016/j.array.2025.100524.
14. Bilousova O., Omelchenko E., Makarchuk M., Mylovanov T. Ukraine's Drones Industry: Investments and Product Innovations. KSE Institute & Brave1. 2024. URL: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/241004-Brave1-report-v.1.pdf> (date of application: 03.11.2025).
15. Tarek M., Zahran S., Oda E., Nafea S. Integrated INS/GNSS Navigation Systems: A Comprehensive Review of Filtering and AI-Based Fusion Techniques. *Suez Canal Engineering, Energy and Environmental Science.* 2025. Vol. 3. P. 17–30. DOI: 10.21608/sceee.2025.378670.1076.
16. Zhuang Y., Sun X., Li Y. та ін. Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion.* 2023. Vol. 95. P. 62–90. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.01.025.
17. Negru S. A., Geragersian P., Petrunin I., Guo W. Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture. *Sensors.* 2024. Vol. 24, no. 3. P. 981. DOI: 10.3390/s24030981.
18. NAVigation innovation support programme Advisory Committee (NAVAC). PNT Vision 2035 White Paper. European Space Agency. 2024. URL: <https://navisp.esa.int/uploads/files/documents/NAVAC%20White%20Paper%20May%202024.pdf> (date of application: 03.11.2025).

19. National Telecommunications and Information Administration (NTIA). Inventory of Complementary, Alternative, and Augmentative PNT Solutions. U.S. Department of Commerce. 2025. URL: <https://www.ntia.gov/sites/default/files/2025-05/inventory-of-pnt-solutions.pdf> (date of application: 03.11.2025).
20. U.S. Department of Transportation (DOT). Complementary Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Action Plan. 2023. URL: https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2023-09/DOT%20Complementary%20PNT%20Action%20Plan_Final.pdf (date of application: 03.11.2025).
21. Nafar N., Fatemi M., Rezaei-Moghaddam K. Smart drone in sustainable agriculture: Evaluating four predictive models for technology adoption in Iran. Artificial Intelligence in Agriculture. 2025. DOI: 10.1016/j.iaia.2025.100594.
22. My Surveying Direct. ROI with DJI Enterprise. 2025. URL: https://www.mysurveyingdirect.com/blogs/surveying/roi-with-dji-enterprise?srsId=AfmBOooJgB6pxju5c26El9EQwo_1aH5KNorpM9UTi6NbwnN3egvKdyECx (date of application: 03.11.2025).
23. Panigati T., Zini M., Striccoli D. та ін. Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. Automation in Construction. 2025. Vol. 173. P. 106101. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106101.
24. European Economic and Social Committee (EESC). Opinion on 'Drone strategy 2.0' (Own-initiative opinion) (C/2023/858). Official Journal of the European Union, C series. 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023IE1646> (date of application: 03.11.2025).
25. DroneUA. Участь DroneUA в UCAB Agrotechnology 2024. 2024. URL: <https://drone.ua/blogs/news/droneua-participation-in-ucab-agrotechnology-2024> (date of application: 03.11.2025).
26. Bonenberg L., Motella B., Paonni M., Fortuny Guasch J. An Assessment of the Future EU Complementary Position Navigation Time (C-PNT) Ecosystem. JRC Technical Report, EUR 31899 EN, Joint Research Centre, European Commission, Luxembourg. 2024. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/681671> (date of application: 03.11.2025).
27. Lendon B. Ukraine's drone defense tech industry is booming amid warfare with Russia. Business Insider. 2025. URL: <https://www.businessinsider.com/ukraine-drone-defense-tech-industry-warfare-russia-attacks-2025-4> (date of application: 03.11.2025).