

DOI 10.33099/2786-7714-2026-1-10-174-184

УДК 629.7:658.512

Головенський Володимир Васильович (кандидат технічних наук)

<https://orcid.org/0000-0002-2320-0895>

Мальований Володимир Вікторович (кандидат технічних наук)

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

Васін Ігор Іванович

<https://orcid.org/0000-0002-8362-9036>

Пузир Марина Сергіївна

<https://orcid.org/0009-0000-1877-4272>

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

Рукопис надійшов до редакції: 10.04.2026; Рукопис прийнято до друку після рецензування: 20.05.2026; Дата публікації: 17.06.2026

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИРОБНИЦТВО БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЧЕРЕЗ ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ

Сучасний ринок безпілотних літальних апаратів в Україні та світі характеризується високими темпами зростання, що супроводжується підвищеними вимогами до швидкості розробки, собівартості, енергоефективності та надійності. В умовах воєнного стану, дефіциту критичних комплектуючих та необхідності оперативного масштабування виробництва, традиційні методи проектування та виробництва виявляють системні обмеження. Метою даної статті є розроблення інтегрованої моделі проектування та виробництва БпЛА на засадах концепції Проектування для виробництва, що поєднує інноваційні технології та інженерні рішення для підвищення економічної ефективності, гнучкості та швидкості масштабування української дрон-економіки. Запропонована авторська модель ґрунтується на системній інтеграції генеративного штучного інтелекту, адитивного виробництва, цифрових двійників та блокчейн-трейдування, трансформуючи традиційну лінійну модель у динамічний адаптивний життєвий цикл продукту. У статті проаналізовано сучасні виклики та технологічні обмеження у сфері проектування та виробництва БпЛА в українському контексті, досліджено вплив інноваційних технологій на оптимізацію конструкцій, аеродинамічних характеристик і міцності, а також оцінено потенціал адитивного виробництва та гібридних матеріалів для зниження собівартості та скорочення часу виходу на ринок. Розроблена інтегрована DfM-модель визначає структурні компоненти та пропонує методику кількісної оцінки економічної ефективності через чисту приведену вартість та рентабельність інвестицій. Ідентифіковано ключові бар'єри впровадження моделі, такі як дефіцит кадрів, висока вартість матеріалів та нестача стандартів, та запропоновано шляхи їх подолання. Кількісна оцінка демонструє, що впровадження моделі може забезпечити зростання експортного потенціалу України до 1,8–2,2 млрд дол. США, збільшення внеску у ВВП до 2,0–2,5% та рентабельність інвестицій на рівні 200–300% протягом 3–5 років. Сформульовано практичні рекомендації для стейкхолдерів щодо впровадження моделі DfM, адаптації технічних стандартів, розвитку національної інфраструктури та інвестицій у R&D, що дозволить перетворити технологічні бар'єри на драйвери економічного зростання та забезпечити стійкість і стратегічну автономію оборонної економіки України.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, проектування та виробництво, інноваційні технології, проектування для виробництва, генеративний штучний інтелект, адитивне виробництво, цифрові двійники, блокчейн-трейдування.

Вступ

Сучасний ринок безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в Україні та світі характеризується високодинамічним зростанням в оборонному, аграрному, логістичному та моніторинговому секторах. Глобальний ринок БпЛА оцінюється як такий, що має зростати сумарним темпом (CAGR) приблизно 15–20% або більше у найближчі роки. Водночас ці галузі висувають підвищені вимоги до швидкості розробки, собівартості, енергоефективності й

надійності продукції. В умовах воєнного стану в Україні, дефіциту критичних комплектуючих та необхідності оперативного масштабування виробництва (зокрема в рамках державної ініціативи Brave1) такі вимоги набувають ще більшого значення. Традиційні методи проектування (CAD/CAE) і виробництва (CNC-обробка, ручне складання) виявляють низку системних обмежень: тривалі життєві цикли розробки, значні витрати на прототипування та обмежену гнучкість до конструктивних змін. У

такому вигляді вони не завжди дозволяють забезпечити оперативну адаптацію до швидко змінюваного ринку та впровадження інновацій. У зв'язку із цим формується об'єктивна потреба у створенні інтегрованої моделі проектування та виробництва, яка об'єднувала б параметричне моделювання, швидке прототипування, адитивне виробництво, цифрові двійники й інтелектуальну систему контролю якості. Така модель спрямована на скорочення часу виходу на ринок (time-to-market), зниження собівартості й підвищення якості БПЛА на всіх етапах їхнього життєвого циклу – від концепції до серійного виробництва.

Матеріали та методи

Проблематика інтегрованого проектування та виробництва безпілотних літальних апаратів з використанням інноваційних технологій набуває дедалі більшої уваги у сучасній науковій літературі. Найактивніше вона розвивається через призму цифрових двійників, адитивного виробництва, генеративного дизайну та адаптації виробничих процесів до обмежень воєнного часу. І. Кабашкін [1] розробив рамкову модель цифрового двійника для управління життєвим циклом літальних апаратів на основі data-driven підходів. Модель інтегрує машинне навчання, симуляційні моделі та моніторинг у реальному часі для скорочення часу розробки, підвищення надійності конструкцій та зниження витрат на прототипування. Використання цифрових двійників забезпечує прогнозування аеродинамічних характеристик і міцності компонентів у різних експлуатаційних сценаріях, що дозволяє мінімізувати кількість фізичних ітерацій і підвищити гнучкість у разі дефіциту комплектуючих – чинника, особливо актуального для українського оборонного сектору.

В. Де Бакер та співавтори [2] аналізують дизайн для багатовісового Fused Filament Fabrication (FFF) з безперервним армуванням волокном, адаптований до конструкцій БПЛА. Завдяки орієнтації волокон уздовж силових ліній забезпечується зниження маси компонентів на 30–50% при збереженні високої питомої міцності, що підвищує аеродинамічну ефективність та дальність польоту. У подальших роботах Колозімо та ін. [3] обґрунтовується застосування методів машинного навчання для моніторингу та контролю якості в процесі лазерного порошкового наплавлення (LPBF). Гібридні сенсорні системи, що поєднують термічні, оптичні та акустичні дані з алгоритмами глибокого навчання, дозволяють знизити рівень браку на 70–85% і скоротити обсяг постобробки – критичний чинник при масштабуванні виробництва компонентів БПЛА. У ширшому огляді А. Х. Аламі та співавт. [4] підкреслюють роль адитивних технологій у зниженні маси деталей до 50%, економії матеріалів та енергії, а також у реалізації принципів сталого виробництва відповідно до SDG 9, 12 та 13. Е. Коч і співавт. [5] підтверджують ефективність використання FDM, SLA та SLS-технологій для повного циклу виробництва БПЛА – від корпусу до пропелерів,

фіксуючи зниження маси на 40–60% і собівартості на 50–70% порівняно з традиційними методами CNC.

Д. Ікбал та Б. Бухнова [6] розробили підхід до створення цифрових двійників для автономних дронів, що поєднує FSM-моделі поведінки, симуляцію в реальному часі та механізми оцінки довіри між агентами. Результати доводять ефективність DT для безпечної колаборації роїв дронів і прогнозування намірів в автономних системах. С. Суваннакхумман і А. Чуа [7] провели огляд застосувань генеративного дизайну у створенні БПЛА, зокрема для оптимізації конструкцій, аеродинаміки та енергоефективності. Вони показали, що генеративні алгоритми дозволяють знизити масу структур на 20–40% та підвищити жорсткість на 15–30%. В. Андрієс і С.-М. Захарія [8] емпірично довели, що поєднання генеративного дизайну, FEA-аналізу й 3D-друку забезпечує скорочення маси рами квадрокоптера на 35% без втрати міцності, що особливо важливо за умов дефіциту CNC-обладнання та потреби швидкого прототипування.

Р. В. Ахмад та співавт. [9] обґрунтували потенціал блокчейну в аерокосмічній і оборонній промисловості як інструмента децентралізованої довіри, безпеки даних та прозорості ланцюгів постачання. Інтеграція з IoT і смарт-контрактами дозволяє зменшити витрати на обслуговування на 10–20% та скоротити час аудиту. Водночас автори відзначають проблеми інтероперабельності, латентності та захисту конфіденційності, що обмежують масштабування таких рішень у динамічних умовах воєнного виробництва.

Звіт Київської школи економіки [10] оцінює масштабування української індустрії БПЛА в межах ініціативи Brave1: від 3–5 тис. одиниць у 2022 р. до понад 4 млн у 2024 р., із загальними інвестиціями 25 млн. дол. США і грантами 5 млн. дол. Аналіз виявляє головні бар'єри – залежність від імпорту комплектуючих (понад 80%), експортні обмеження та кадровий дефіцит – і пропонує застосування DfM-підходів для підвищення ефективності виробництва. За оглядом О. Ігнатенка [11], у 2024 р. платформа Brave1 об'єднувала близько 800 стартапів, демонструючи 75% річний приріст. Водночас сектор стикається з нестачею фінансування, дефіцитом кадрів та високим навантаженням на виробничу базу, що підкреслює актуальність модульних і швидкоітерованих моделей DfM для стійкого розвитку української дрон-економіки.

Незважаючи на зростання кількості наукових і прикладних досліджень, література поки не пропонує інтегрованої економіко-інженерної моделі, яка б поєднувала генеративний штучний інтелект, адитивне виробництво, цифрові двійники та блокчейн-трейсування в єдиний DfM-цикл, адаптований до умов воєнного часу та специфіки українського ринку. Усунення цієї наукової лакуни визначає актуальність розроблення авторської концепції, спрямованої на скорочення time-to-market, підвищення технологічної

автономності та нарощення експортного потенціалу сектору БПЛА.

Метою статті є розроблення інтегрованої моделі проектування та виробництва безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на засадах концепції Design-for-Manufacturing (DfM), що поєднує інноваційні технології та інженерні рішення для підвищення економічної ефективності, гнучкості та швидкості масштабування в умовах розвитку української дрон-економіки. Авторський підхід ґрунтується на системній інтеграції генеративного штучного інтелекту, адитивного виробництва, цифрових двійників та блокчейн-трейдування, що дозволяє трансформувати традиційну лінійну модель виробничого процесу у динамічний адаптивний життєвий цикл продукту. Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

1. Проаналізувати сучасні виклики та технологічні обмеження у сфері проектування та виробництва БПЛА, із урахуванням українського контексту.

2. Дослідити вплив інноваційних технологій на оптимізацію конструкцій, аеродинамічних характеристик і міцності БПЛА.

3. Оцінити потенціал адитивного виробництва та гібридних матеріалів для зниження собівартості, скорочення капітальних витрат і прискорення виходу продукції на ринок.

4. Розробити авторську інтегровану DfM-модель для БПЛА, визначивши її структурні компоненти та для кількісної оцінки економічної ефективності.

5. Ідентифікувати ключові бар'єри впровадження моделі та кількісно оцінити її потенційний внесок у приріст ВВП і розширення експортного потенціалу України.

6. Сформулювати практичні рекомендації для стейкхолдерів щодо впровадження моделі DfM, адаптації технічних стандартів і розвитку національної інфраструктури виробництва БПЛА.

Результати

Глобальний ринок безпілотних літальних апаратів (БПЛА) демонструє стаке високодинамічне зростання, зумовлене мультисекторальним попитом у сферах оборони, прецизійного землеробства, логістики, геомоніторингу та охорони критичної інфраструктури. Аналітичні оцінки свідчать, що упродовж 2021–2035 рр. середньорічні темпи зростання (CAGR) становитимуть 11,7–16,3%, тоді як обсяг глобального ринку збільшиться з 70,9 млрд дол. США до 2030 р. до 191,9 млрд дол. США до 2035 р. [12–15]. Домінуючим сегментом залишається оборонний, де БПЛА забезпечують операції розвідки, спостереження, рекогносцировки (ISR) та високоточне ураження цілей у гібридних конфліктах. Водночас комерційний сектор демонструє найвищу динаміку зростання завдяки інтеграції автономних систем у сфери аерофотозйомки, моніторингу врожаю, геодезії та доставки вантажів [12–16]. Така траєкторія розвитку формує потребу у

скороченні циклів розробки, зниженні собівартості та підвищенні експлуатаційної надійності, що неможливо забезпечити в межах традиційних парадигм проектування й виробництва.

Традиційні технології комп'ютерного проектування та інженерного аналізу (CAD/CAE) і числового програмного керування верстатами (CNC) мають системні обмеження: тривалість ітераційних циклів, високу вартість інструментального оснащення та низьку адаптивність до змін конструкції. CAD/CAE-системи, попри ефективність симуляцій аеродинамічних і міцнісних характеристик, ґрунтуються на послідовному моделюванні, що спричиняє затримки від кількох тижнів до місяців під час створення складних геометрій БПЛА і не враховує мультифізичні ефекти (зокрема термодформаційні).

CNC-обробка характеризується значними витратами на оснащення (до 50% собівартості) та матеріальними втратами до 40–90% під час виготовлення композитних деталей, що гальмує серійне масштабування [4]. Унаслідок цього виникає надлишкова маса конструкцій (на 20–30% більша, ніж в адитивних аналогах), обмежується можливість інтеграції сенсорних модулів, а час виходу на ринок зростає на 30–50% у межах малих і середніх серій.

Український контекст загострює ці технологічні обмеження через поєднання воєнного стану, дефіциту критичних компонентів і необхідності швидкого нарощування виробництва. З 2022 р. національний сектор БПЛА зріс із приблизно 5 тис. одиниць до понад 4 млн у 2024 р., із потенціалом 5–10 млн одиниць щорічно за умови стабільного фінансування (зокрема, понад 2,2 млн FPV-дронів у 2024 р.) [10; 11; 16]. Україна входить до числа світових лідерів за кількістю виробників – понад 500 компаній і понад 1000 моделей. Водночас імпортна залежність сягає ≈97% (мікроелектроніка, літій-іонні акумулятори, оптика), що робить галузь вразливою до експортних обмежень Китаю 2025 р. та до логістичних збоїв, спричинених воєнними діями. Додатковими викликами є дефіцит інженерних кадрів CAD/CAE-профілю, обмежене бюджетне фінансування оборонних замовлень і чинна заборона на експорт, яка знижує завантаження виробничих потужностей до 30%. У сукупності ці чинники стримують інноваційний розвиток галузі та потенційно зменшують внесок у ВВП на мільярди доларів США до 2030 р. [10; 11; 16].

У таких умовах перехід до роєвих архітектур із системами штучного інтелекту та автономної навігації (зокрема антиджемінгові антени Quantum Systems, дрони-«матки» з візуально-інерційною навігацією) вимагає модульних DfM-підходів із короткими виробничими циклами (< 3 місяців), що виходить за межі можливостей традиційних методів [16].

Інституційними драйверами подолання структурних бар'єрів виступають державна платформа Brave1 та галузева екосистема

DroneUA, які формують ядро українського кластеру DefenseTech. Ініційована Міністерством цифрової трансформації у 2023 р., Brave1 об'єднує понад 800 стартапів (щорічний приріст $\approx 75\%$), надає грантове фінансування (≈ 5 млн дол. США) й акселераційні програми, а також запровадила систему Army of Drones Bonus (бюджет > 1 млрд грн) як механізм матеріального стимулювання. Платформа виконує функції державного каталогу закупівель (Brave1 Market) і у 2025 р. фокусується на розвитку AI-керування полем бою, розв'язку систем та міжнародній кооперації (масштабування виробництва у Великій Британії, фінансування ЄС у розмірі 1,5 млрд євро), формуючи "Defense Tech Valley" як простір інтеграції NATO-сумісних стандартів [14; 16].

Компанія DroneUA, провідний системний інтегратор і дистриб'ютор Східної Європи, координує понад 700 підприємств і забезпечує повний інноваційний цикл – від AI-систем семантичної сегментації Linza/ZOOM до навчальних симуляторів LifesaverSIM (понад 80 тис. користувачів). Ці ініціативи стимулюють локалізацію виробництва до 40%, відкривають експортні канали на ринок США та створюють передумови для гармонізації технічних стандартів, що є визначальним чинником стійкості української дрон-економіки в умовах тривалої війни.

Інтеграція генеративного ШІ, параметричного моделювання та цифрових двійників зумовлює зміну парадигми проектування безпілотних літальних апаратів, забезпечуючи суттєве скорочення ітераційних циклів та підтримку мультиоб'єктивної оптимізації аеродинамічних і структурних параметрів. Сучасні дослідження показують, що використання генеративних алгоритмів і методів навчання з підкріпленням дає змогу автоматизувати процес синтезу форм, зменшити розмірність простору проектування та підвищити ефективність пошуку оптимальних рішень [17–19].

У межах генеративних підходів мережі антагоністичного навчання (Bézier-GAN) застосовуються для компактного кодування аеродинамічних профілів у латентному просторі низької розмірності, що зменшує кількість змінних і підвищує збіжність оптимізації порівняно з традиційними параметризаціями PARSEC чи CST [17]. Варіаційно-антагоністичні моделі (VAE-GAN, Airfoil GAN) поєднують автоенкодер та генератор для синтезу аеропрофілів без попереднього задання геометричних параметрів, забезпечуючи еволюцію форм у латентному просторі та оптимізацію співвідношення підйомної сили до опору (C_l/C_d) [18]. Методи навчання з підкріпленням, зокрема Proximal Policy Optimization (PPO), розглядають формування аеропрофілю як задачу марковського процесу прийняття рішень: агент послідовно модифікує контур, отримуючи винагороду за покращення аеродинамічних показників. Такі підходи доводять ефективність у порівнянні з градієнтними

методами та демонструють вищу стійкість до шуму в оцінках CFD [19].

Паралельно з цим розвиваються математичні моделі мультифізичної оптимізації, що формалізують компроміси між аеродинамічним опором (C_d), структурною деформацією (δ_{max}) та масою (m) через нелінійне програмування у формі

$$\min F(x) = w_1 m(x) + w_2 C_d(x) + w_3 \delta_{max}(x), \quad (1)$$

де вагові коефіцієнти w_i адаптуються до режимів експлуатації (наприклад, ройові місії чи тривала розвідка). Інтеграція такого підходу з адитивним виробництвом підсилює реалізацію DfM-принципів, скорочуючи етапи постобробки та матеріальні втрати [4, 8]. Додатково, автоматизоване перетворення результатів топологічної оптимізації у параметричні CAD-моделі на основі алгоритмів розпізнавання гратчастих структур дозволяє зменшити час переходу від симуляції до виробництва та мінімізує людське втручання у моделюванні [20].

Цифрові двійники слугують віртуальними репліками фізичних систем, які поєднують дані реального часу з високоточними моделями (FEM, CFD) для віртуального тестування та прогнозування поведінки в екстремальних умовах без необхідності створення фізичних прототипів [1, 6]. Розроблені DT-архітектури включають підсистеми сприйняття (LiDAR, камери), планування траєкторій (A*, RRT*), навігації (EKF, UKF) та керування (PID, MPC), забезпечуючи повну цифрову репрезентацію життєвого циклу від проектування до експлуатації з інтеграцією в ROS2 та Gazebo [21]. Стандарти ISO/DIS 23247-5 визначають методологію «digital thread» як інформаційний ланцюг, що забезпечує трасування даних від CAD-середовища до IoT-сенсорів та підтримку цифрових двійників на всіх етапах життєвого циклу виробу [22], що дозволяє гармонізувати дані між підсистемами проектування, виробництва та експлуатації, забезпечуючи високий рівень відтворюваності і сертифікаційної прозорості для оборонних застосувань.

Емпіричні результати застосування генеративного дизайну та адитивного виробництва в конструкціях БпЛА демонструють зменшення маси до 20–40% та підвищення жорсткості до 15–30% залежно від матеріалу й умов експлуатації [7, 8]. Узагальнення цих технологій у єдину DfM-модель дозволяє перейти від лінійної схеми "проектування – виробництво" до адаптивного цифрового циклу, що скорочує час виходу на ринок та зменшує ризики невідповідності між віртуальним і фізичним виробом.

Поєднання генеративного ШІ, адитивного виробництва (AM), цифрових двійників та інструментів трейсованості на основі блокчейну формує адаптивний DfM-цикл, який забезпечує узгоджений перехід від концептуального проектування до серійного випуску та експлуатаційного моніторингу БпЛА. На рівні проектування генеративні методи (зокрема моделі

GAN, VAEGAN і RL) скорочують розмірність простору варіантів і підтримують мультиоб'єктивну оптимізацію параметрів маси, жорсткості та аеродинаміки [7, 8]. DfAM-принципи, окреслені в систематичних оглядах, орієнтують конструкції на виробничу придатність: консолідацію деталей (зменшення кількості складальних одиниць), оптимізацію решітчастих структур (*lattice*), мінімізацію опор і інтеграцію функціональних елементів (канали охолодження, сенсорні ніші), що в сукупності може забезпечувати істотне зниження маси та витрат порівняно з традиційними технологіями [23].

Як виконавчий шар, адитивне виробництво реалізує складні геометрії та характеризується високим коефіцієнтом використання матеріалу. Згідно з дослідженнями в аерокосмічній галузі, коефіцієнт *buy-to-fly* (BTF) для AM становить близько 1:1–3:1, тоді як для фрезерування з масивних заготовок – до 11:1, а в окремих випадках знижується з 33:1 до 1:1 при переході на металеве AM-виробництво [4; 27; 28], що прямо впливає на собівартість, логістику матеріалів і сталий розвиток.

Цифрові двійники забезпечують віртуальну валідацію конструкцій і переносять частину випробувань у симуляційне середовище (SiL/HiL), даючи змогу прогнозувати поведінку конструкцій у реальному часі (деформації, деградація вузлів, вплив температурних градієнтів) [1; 6]. Методологія *digital thread*, визначена в ISO/DIS 23247-5 та програмі NIST Digital Thread for Manufacturing, формує наскрізний інформаційний ланцюг життєвого циклу виробу – від CAD/CAE-моделі до виробництва й експлуатації – із правилами структурування даних, трасування змін і вимогами до сумісності PLM–MES–IoT [22; 24].

На рівні трейсованості впровадження блокчейну підвищує прозорість ланцюга постачань: забезпечує автентичність компонентів, антифальсифікаційний контроль, сертифікацію матеріалів і захист інтелектуальної власності. У сфері аерокосмічної й оборонної промисловості такі системи застосовують для смарт-контрактів у MRO та відстеження походження матеріалів [9].

Економічна ефективність DfM-моделі оцінюється через чисту приведену вартість (NPV) та рентабельність інвестицій (ROI), що відображають зниження витрат на прототипування (до 70–90%) і скорочення *time-to-market* (до 50–80%). Формально:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0, ROI = \frac{NPV}{I_0} \times 100\%, \quad (2)$$

де CF_t – грошовий потік у період t ;
 r – ставка дисконту (8–12% для DefenseTech);
 I_0 – початкові інвестиції;
 T – горизонт планування (3–5 років) [25].

Методичну основу для оцінювання формують NIST SP 1176 і дослідження з техніко-

економічного аналізу адитивного виробництва, які показують залежність ефективності від серійності, складності геометрії та обсягу постобробки [4; 25].

У контексті української дрон-економіки DfM-підхід реалізується у гібридних кластерах Brave1 і DroneUA, де генеративний дизайн застосовується для оптимізації рам FPV-дронів (зменшення маси на 25–35%), 3D-друк на FDM/SLS-системах забезпечує серійність до 80 тис. одиниць на місяць, а DT супроводжує симуляцію бойових навантажень і підвищує готовність до масштабування [10; 11; 16]. Комплексна інтеграція цих елементів створює замкнену DfM-архітектуру, яка поєднує швидку адаптацію конструкцій, ефективність виробництва й довіру до ланцюгів постачань.

Інтеграція DfM-моделі, що поєднує генеративний штучний інтелект, адитивне виробництво (AM), цифрових двійників і блокчейн-трейсованість, формує потужний економічний імпульс для української дрон-індустрії. Перехід від імпортозалежного до експортно орієнтованого виробництва може забезпечити до 2 млрд дол. США експортного обсягу до 2030 р., за умови локалізації виробництва на 60–70% і приєднання до НАТО-сумісних ланцюгів постачань [10; 14; 32]. Така динаміка потенційно збільшить внесок у ВВП оборонно-промислового комплексу на 1,5–2,5%, зменшивши імпорту залежність із 97% до менш як 50% і довівши серійний випуск до 8–10 млн. одиниць на рік. Очікуваний ROI DfM-підходу становить 150–300% протягом 3–5 років, що пояснюється зниженням собівартості на 50–70% і скороченням *time-to-market* на 60–80%, відкриваючи нові ринки ЄС, США та Близького Сходу [25; 32].

Водночас масштабування DfM-рішень обмежується низкою системних бар'єрів. Дослідження [29] класифікують 18 чинників, що стримують промислове впровадження AM: дефіцит кадрів, висока вартість матеріалів, нестача стандартів, обмеження обладнання, проблеми з повторюваністю та контролем якості. Найкритичнішими для України є саме матеріали, програмне забезпечення та освіта, що визначають готовність до переходу від прототипування до серійного виробництва. AM-технології змінюють структуру постачань із глобальної на регіональну, скорочуючи час виконання на 40–70%. Проте це супроводжується високими витратами на матеріали, браком стандартизації, нестачею персоналу, складністю інтеграції з ERP/MES-системами та ризиками постачання [30].

У військовій сфері AM швидше впроваджується у MRO-сегменті (on-demand-виробництво та ремонт на місці), тоді як первинне виробництво стримується сертифікаційними процедурами й вартісними обмеженнями. Україна виступає прикладом краудсорсинг-мережі виробників, де поєднання промислових і волонтерських ініціатив формує гнучку екосистему компонентів для ЗСУ, але потребує

професіоналізації, регуляції та захисту інтелектуальної власності [31].

Україна має високий інвестиційний потенціал галузі: світовий ринок БПЛА зростає з 73 млрд дол. США (2024 р.) до 163–223 млрд. дол. США (2030–2034 р.), а Україна вже виробляє понад 1

млн дронів на рік. Інвестиції приватних і міжнародних компаній (зокрема Renault, 2025 р.) свідчать про зростання довіри та інтеграцію у глобальні ланцюги постачань [10; 32].

Таблиця 1

Кількісна оцінка економічного потенціалу та бар'єрів впровадження DfM-моделі для виробництва БПЛА в Україні

Показник	Базовий сценарій (2024 р.)	Прогноз із DfM (2030 р.)	Δ (%)	Ключові бар'єри (за [29–31])	Шляхи подолання
Експортний обсяг (млрд USD)	0,1–0,2	1,8–2,2	+900–1100	Матеріали, стандарти, сертифікація	Гармонізація ISO/ASTM; сертифікація через Brave1; консалтинг M&A [32]
Внесок у ВВП (%)	0,5–0,8	2,0–2,5	+150–200	Вартість, освіта, інтеграція ERP	Локальні мікрохаби; державні гранти; експортні стратегії [32]
ROI інвестицій (%)	80–120	200–300	+150–180	Кіберризика, повторюваність, MRO	Квантові протоколи; мобільні MRO-центри; ризик-менеджмент [32]
Серійний випуск (млн од./рік)	4,0	8–10	+100–150	Обладнання, моніторинг, постачальники, постобробка	Автоматизація; "right to repair"; партнерства (Renault тощо) [32]

Джерело: складено автором на основі [10; 11; 12; 14; 16; 25; 29–32]

Обговорення

Аналіз таблиці 1 підтверджує синергійний ефект DfM-моделі: приріст експорту на 900–1100% не лише компенсує імпорту вразливість, а й генерує мультиплікативний ефект для суміжних секторів, потенційно додаючи 5–7 млрд USD кумулятивного експорту до 2030 р. Гармонізація стандартів (ISO/ASTM) може скоротити час сертифікації компонентів із 12–18 місяців до 3–6, а завантаження виробничих потужностей – підвищити з 30% до 80%. Інвестування в R&D (понад 100 млн USD через публічно-приватні партнерства) забезпечить технологічну автономність, мінімізуючи логістичні ризики.

Наразі [29], 64% компаній вказують на брак CAD-інструментів для AM-дизайну, а 73% – на дефіцит матеріалів. Виробництво за запитом (on-demand manufacturing) та принцип конструктивної ремонтпридатності (repairability by design) виступають ключовими чинниками оперативної готовності у військових застосуваннях. Дослідження [31], демонструють практичний вимір розвитку галузі: у 2025 р.: компанія Renault оголосила про інвестиції у виробництво дронів в Україні; обсяг глобального ринку БПЛА перевищив 160 млрд USD; в Україні у 2024 р. виготовлено понад 1 млн апаратів, а до 2025 р. прогнозується зростання до 4,5 млн одиниць. З урахуванням цих факторів, DfM-модель перетворює технологічні бар'єри на драйвери економічного зростання, забезпечуючи стійкість і

стратегічну автономію оборонної економіки України в умовах гібридних загроз.

Висновки

Проведений аналіз підтверджує, що впровадження інтегрованої DfM-моделі, яка поєднує генеративний штучний інтелект, адитивне виробництво, цифрових двійників і блокчейн-трейсованість, має потужний трансформаційний потенціал для української дрон-економіки. Ця модель здатна забезпечити перехід від імпортозалежного сектору до конкурентоспроможного експортного кластера з внеском у ВВП до 2,5% і експортом до 2 млрд USD до 2030 р. Її ефективність визначається не лише технологічними інноваціями, а й здатністю подолати структурні бар'єри, виявлені у дослідженнях [29–31], та інституціоналізувати інноваційні практики, апробовані під час війни.

Для переходу від прототипування до серійного виробництва з локалізацією понад 70% необхідно створити 5–10 національних центрів компетенцій у форматі публічно-приватних партнерств. Вони мають фокусуватися на розвитку адитивних матеріалів і процесів (гібридні композити, металеві порошки), впровадженні генеративного ШІ та цифрових двійників для оптимізації конструкцій і симуляції експлуатаційних навантажень, забезпеченні кіберстійкості через блокчейн-трейсованість і квантово-стійке шифрування, а також на розробленні мобільних рішень для технічного обслуговування за запитом

(on-demand manufacturing) із конструктивною ремонтпридатністю (repairability by design) як ключовими чинниками оперативної готовності.

Доцільним є створення таких центрів у кластерному форматі (Київ, Львів, Харків, Дніпро) з інтеграцією в університетське середовище (КПІ, ХНУРЕ) та орієнтацією на публічно-приватне фінансування (Brave1, інвестори на кшталт Renault). Цільовий бюджет має становити не менше 100 млн USD, із поєднанням державних грантів, прямих іноземних інвестицій і військово-технологічного венчурного капіталу. Паралельно слід розвивати освітню складову: інтегрувати модулі DfAM, AM і цифрових двійників у навчальні програми технічних університетів, запровадити програми перекваліфікації для щонайменше 50 тис. фахівців до 2030 р., розширити партнерства з ЄС у межах програм Erasmus+ та Horizon Europe.

Подальші дослідження мають зосередитися на застосуванні квантових обчислень для генеративного дизайну, що дозволить моделювати мільйони варіантів аеродинаміки та структур у режимі реального часу, скорочуючи time-to-market на 90%. Перспективним напрямом є також розвиток роевих технологій із використанням цифрових двійників і блокчейну для децентралізованої координації автономних систем, стійких до засобів радіоелектронної боротьби, та інтеграції з інфраструктурою 6G. У сфері матеріалознавства доцільним є дослідження гібридних AM-матеріалів із функцією самовідновлення, придатних для оперативного ремонту в польових умовах, а в економічному вимірі – побудова економетричних моделей ROI для порівняння ефективності DfM і традиційного виробництва в умовах гібридної війни.

Україна має унікальне вікно можливостей для перетворення воєнних інновацій на джерело сталого економічного зростання. Формування мережі центрів компетенцій, державна підтримка DfM-технологій і стратегічні інвестиції у R&D дозволять не лише вийти на глобальний ринок обсягом понад 160 млрд. дол. США, але й утвердити Україну як НАТО-сумісний хаб дрон-технологій, що забезпечить технологічний суверенітет і довгострокову економічну стійкість держави.

Список використаних джерел

- [1.] I. Kabashkin, "Digital twin framework for aircraft lifecycle management based on data-driven models," *Mathematics*, vol. 12, no. 19, p. 2979, 2024, doi: 10.3390/math12192979. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/19/2979>. [Дата звернення: 3 листоп. 2025].
- [2.] W. De Backer, P. Sinkez, R. D'Cunha, and M. Van Tooren, "Design for multi-axis fused filament fabrication with continuous fiber reinforcement: Unmanned aerial vehicle applications," 2018, doi: 10.2514/6.2019-0156. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-0156>. [Дата звернення: 3 листоп. 2025].
- [3.] B. M. Colosimo, S. Maggi, M. Grasso, and F. Caldirola, "In-process monitoring and control for laser powder bed fusion: A statistical perspective," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 2024, <https://doi.org/10.1002/asmb.70001.1002/asmb.70001>.
- [4.] A. H. Alami та ін., "Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 12, p. 102516, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102516>.
- [5.] E. Koç, C. Caliskan, M. Coşkun, and H. Khan, "Unmanned aerial vehicle production with additive manufacturing," *Journal of Aviation*, vol. 4, no. 1, pp. 22–30, 2020, <https://doi.org/10.30518/jav.681037>.
- [6.] D. Iqbal and B. Buhnova, "Digital twin design for autonomous drones," in *Proc. 19th Conf. Comput. Sci. Intell. Syst. (FedCSIS)*, 2024, pp. 119–130, <https://doi.org/10.15439/2024F6765>.
- [7.] S. Souvahnakhoomman and A. Chua, "A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 163–175, 2025, <https://doi.org/10.11113/aej.V15.21286>.
- [8.] V. Andries and S.-M. Zaharia, "Generative design, simulation, and 3D printing of the quadcopter drone frame," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 17, p. 9647, 2025, <https://doi.org/10.3390/app15179647>.
- [9.] R. W. Ahmad, H. Hasan, I. Yaqoob, K. Salah, R. Jayaraman, and M. Omar, "Blockchain for aerospace and defense: Opportunities and open research challenges," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 150, p. 106982, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106982>.
- [10.] Kyiv School of Economics, Brave1 Report v.1: Scaling Ukraine's Defense Tech Ecosystem, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/241004-Brave1-report-v.1.pdf>.
- [11.] AIN.UA, "Ukrainian defense tech in 2024 and prospects for 2025," 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://en.ain.ua/2025/01/31/ukrainian-defense-tech-in-2024/>.
- [12.] Fortune Business Insights, Unmanned Aerial Vehicle [UAV] Market Size, Share & Industry Analysis, 2025-2032, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-101603>.
- [13.] Allied Market Research, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market by Product Type, Component, Application, Mode of Operation, Range, and End User: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2030, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно:

- <https://www.alliedmarketresearch.com/unmanned-aerial-vehicle-market-A09059>.
- [14.] "Official website of the Brave1 platform," Brave1, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://brave1.gov.ua/>.
- [15.] Research Nester, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Size and Forecast, by Application... Growth Trends, Key Players, Regional Analysis 2026-2035, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.researchnester.com/reports/unmanned-aerial-vehicle-market/6364>.
- [16.] В. Недашківський, "Кара небесна: Топ-10 видів безпілотників української індустрії дронів," Бізнес Цензор, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://censor.net/biz/resonance/3573048/top-10-vydiv-bezpilotnykiv-ukrayinskoyi-industriyi-droniv>.
- [17.] W. Chen, K. Chiu, and M. D. Fuge, "Airfoil design parameterization and optimization using bézier generative adversarial networks," AIAA Journal, vol. 58, no. 11, pp. 4723–4735, 2020. Доступно: <https://arxiv.org/pdf/2006.12496>.
- [18.] Y. Wang, K. Shimada, and A. Barati Farimani, "Airfoil GAN: Encoding and synthesizing airfoils for aerodynamic shape optimization," Journal of Computational Design and Engineering, vol. 10, no. 4, pp. 1350–1362, 2023. Доступно: <https://arxiv.org/pdf/2101.04757>.
- [19.] T. P. Dussauge, W. Sung, O. J. Pinon Fischer, та ін., "A reinforcement learning approach to airfoil shape optimization," Scientific Reports, vol. 13, p. 9753, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36560-z>.
- [20.] J. Polak and M. Nowak, "From structural optimization results to parametric CAD modeling—automated, skeletonization-based truss recognition," Applied Sciences, vol. 13, no. 9, p. 5670, 2023, <https://doi.org/10.3390/app13095670>.
- [21.] D. Iqbal and B. Buhnova, "Digital twin design for autonomous drones," pp. 119–130, 2024, <https://doi.org/10.15439/2024F6765>.
- [22.] International Organization for Standardization, Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 5: Digital thread for digital twin, ISO/DIS 23247-5, 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.iso.org/standard/87425.html>.
- [23.] A. Alfaify, M. Saleh, F. M. Abdullah, and A. M. Al-Ahmari, "Design for additive manufacturing: A systematic review," Sustainability, vol. 12, no. 19, p. 7936, 2020, <https://doi.org/10.3390/su12197936>.
- [24.] International Organization for Standardization, Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 5: Digital thread for digital twin, ISO/DIS 23247-5, 2025. Доступно: <https://www.iso.org/standard/87425.html>; та National Institute of Standards and Technology (NIST), Digital Thread for Manufacturing, 2025. [Електронний ресурс]. [Доступно: <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-manufacturing>.
- [25.] M. Sartini, C. Favi, and M. Mandolini, "Rapid investment casting: a techno-economic analysis for evaluating VAT photopolymerisation processes," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 134, pp. 5717–5739, 2024, <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14331-y>.
- [26.] S. Souvannakhoonman and A. Chua, "A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles," ASEAN Engineering Journal, vol. 15, no. 1, pp. 163–175, 2025, <https://doi.org/10.11113/aej.V15.21286>.
- [27.] B. Blakey-Milner та ін., "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," Materials & Design, vol. 209, p. 110008, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>.
- [28.] R. Dehoff та ін., "Case study: Additive manufacturing of aerospace brackets," Advanced Materials & Processes, p. 1, берез. 2013. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://scispace.com/pdf/case-study-additive-manufacturing-of-aerospace-brackets-53n5x6c5tb.pdf>.
- [29.] L. Thomas-Seale, J. Kirkman-Brown, D. Espino, M. Attallah, and D. Shepherd, "The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry," International Journal of Production Economics, vol. 198, pp. 104–118, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.02.003>.
- [30.] A. Ronchini, A. M. Moretto, and F. Caniato, "Adoption of additive manufacturing technology: Drivers, barriers and impacts on upstream supply chain design," International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, vol. 53, no. 4, pp. 532–554, 2023, <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2021-0541>.
- [31.] L. Suckau, "Additive manufacturing in the military technology sector: Application and proliferation of an emerged technology," Peace Research Institute Frankfurt (PRIF), PRIF Report 3/2025, 2025, <https://doi.org/10.48809/prifrep2503>.
- [32.] "Drone production in Ukraine: A high-growth investment opportunity," UA Consulting Blog, 8 черв. 2025. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://uaconsulting.eu/2025/06/08/drone-production-in-ukraine/>.

Volodymyr Holovenskyi (Candidate of Technical Sciences)

<https://orcid.org/0000-0002-2320-0895>

Volodymyr Malovanyi (Candidate of Technical Sciences)

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

Ihor Vasin

<https://orcid.org/0000-0002-8362-9036>

Maryna Puzyr

<https://orcid.org/0009-0000-1877-4272>

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

DESIGN AND MANUFACTURING OF UNMANNED AERIAL VEHICLES THROUGH INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND ENGINEERING SOLUTIONS

The modern market of Unmanned Aerial Vehicles in Ukraine and worldwide is characterized by high growth rates, accompanied by increased demands for development speed, cost-effectiveness, energy efficiency, and reliability. Under the conditions of martial law, a deficit of critical components, and the need for rapid production scaling, traditional design and manufacturing methods reveal systemic limitations. The purpose of this article is to develop an integrated design and manufacturing model for UAVs based on the Design-for-Manufacturing concept, which combines innovative technologies and engineering solutions to enhance the economic efficiency, flexibility, and scaling speed of the Ukrainian drone economy. The proposed author's model is based on the systematic integration of generative artificial intelligence, additive manufacturing, digital twins, and blockchain traceability, transforming the traditional linear model into a dynamic adaptive product lifecycle. The article analyzes contemporary challenges and technological constraints in UAV design and manufacturing within the Ukrainian context, investigates the impact of innovative technologies on optimizing structures, aerodynamic characteristics, and strength, and assesses the potential of additive manufacturing and hybrid materials for cost reduction and accelerated market entry. The developed integrated DfM model defines structural components and proposes a methodology for quantitative assessment of economic efficiency through Net Present Value and Return on Investment. Key barriers to the model's implementation are identified, such as personnel shortages, high material costs, and a lack of standards, and pathways to overcome them are proposed. Quantitative assessment demonstrates that the implementation of the model could ensure an increase in Ukraine's export potential to 1.8–2.2 billion USD, an increase in GDP contribution to 2.0–2.5%, and an ROI of 200–300% over 3–5 years. Practical recommendations for stakeholders are formulated regarding the implementation of the DfM model, adaptation of technical standards, development of national infrastructure, and investment in R&D, which will transform technological barriers into drivers of economic growth and ensure the resilience and strategic autonomy of Ukraine's defense economy.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, design and manufacturing, innovative technologies, design-for-manufacturing, generative artificial intelligence, additive manufacturing, digital twins, blockchain traceability.*

References

- [1.] I. Kabashkin, "Digital twin framework for aircraft lifecycle management based on data-driven models," *Mathematics*, vol. 12, no. 19, p. 2979, 2024, doi: 10.3390/math12192979. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/19/2979>.
- [2.] W. De Backer, P. Sinkez, R. D'Cunha, and M. Van Tooren, "Design for multi-axis fused filament fabrication with continuous fiber reinforcement: Unmanned aerial vehicle applications," 2018, doi: 10.2514/6.2019-0156. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-0156>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [3.] B. M. Colosimo, S. Maggi, M. Grasso, and F. Caldirola, "In-process monitoring and control for laser powder bed fusion: A statistical perspective," *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 2024, doi: 10.1002/asmb.70001. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/asmb.70001>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [4.] A. H. Alami et al., "Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goals," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 12, p. 102516, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102516. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923004057>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [5.] E. Koç, C. Caliskan, M. Coşkun, and H. Khan,

- "Unmanned aerial vehicle production with additive manufacturing," *Journal of Aviation*, vol. 4, no. 1, pp. 22–30, 2020, doi: 10.30518/jav.681037. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/342378203_Unmanned_Aerial_Vehicle_Production_with_Additive_Manufacturing. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [6.] D. Iqbal and B. Buhnova, "Digital twin design for autonomous drones," in *Proc. 19th Conf. Comput. Sci. Intell. Syst. (FedCSIS)*, 2024, pp. 119–130, doi: 10.15439/2024F6765.
- [7.] S. Souvahnakhoomman and A. Chua, "A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 163–175, 2025, doi: 10.11113/aej.V15.21286. [Online]. Available: <https://journals.utm.my/aej/article/view/21286>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [8.] V. Andries and S.-M. Zaharia, "Generative design, simulation, and 3D printing of the quadcopter drone frame," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 17, p. 9647, 2025, doi: 10.3390/app15179647. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/17/9647>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [9.] R. W. Ahmad, H. Hasan, I. Yaqoob, K. Salah, R. Jayaraman, and M. Omar, "Blockchain for aerospace and defense: Opportunities and open research challenges," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 150, p. 106982, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106982.
- [10.] Kyiv School of Economics, *Bravel Report v.1: Scaling Ukraine's Defense Tech Ecosystem*, 2024. [Online]. Available: <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/10/241004-Bravel-report-v.1.pdf>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [11.] AIN.UA, "Ukrainian defense tech in 2024 and prospects for 2025," 2025. [Online]. Available: <https://en.ain.ua/2025/01/31/ukrainian-defense-tech-in-2024/>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [12.] Fortune Business Insights, *Unmanned Aerial Vehicle [UAV] Market Size, Share & Industry Analysis, 2025-2032*, 2025. [Online]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-101603>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [13.] Allied Market Research, *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market by Product Type, Component, Application, Mode of Operation, Range, and End User: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2030*, 2021. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/unmanned-aerial-vehicle-market-A09059>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [14.] "Official website of the Bravel platform," *Bravel*, 2025. [Online]. Available: <https://bravel.gov.ua/>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [15.] Research Nester, *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Size and Forecast, by Application... Growth Trends, Key Players, Regional Analysis 2026-2035*, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchnester.com/reports/unmanned-aerial-vehicle-market/6364>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [16.] V. Nedashkivskyi, "Heaven's punishment: Top 10 types of drones of the Ukrainian drone industry," *Biznes Tsenzor*, 2025. [Online]. Available: <https://censor.net/biz/resonance/3573048/top-10-vydiv-bezpilotnykiv-ukrayinskoyi-industriyi-droniv>. [Accessed: Nov. 3, 2025]. (in Ukrainian)
- [17.] W. Chen, K. Chiu, and M. D. Fuge, "Airfoil design parameterization and optimization using bézier generative adversarial networks," *AIAA Journal*, vol. 58, no. 11, pp. 4723–4735, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2006.12496>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [18.] Y. Wang, K. Shimada, and A. Barati Farimani, "Airfoil GAN: Encoding and synthesizing airfoils for aerodynamic shape optimization," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 1350–1362, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2101.04757>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [19.] T. P. Dussauge, W. Sung, O. J. Pinon Fischer, et al., "A reinforcement learning approach to airfoil shape optimization," *Scientific Reports*, vol. 13, p. 9753, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-36560-z.
- [20.] J. Polak and M. Nowak, "From structural optimization results to parametric CAD modeling—automated, skeletonization-based truss recognition," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 9, p. 5670, 2023, doi: 10.3390/app13095670.
- [21.] D. Iqbal and B. Buhnova, "Digital twin design for autonomous drones," pp. 119–130, 2024, doi: 10.15439/2024F6765.
- [22.] International Organization for Standardization, *Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 5: Digital thread for digital twin, ISO/DIS 23247-5*, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/87425.html>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [23.] A. Alfaify, M. Saleh, F. M. Abdullah, and A. M. Al-Ahmari, "Design for additive manufacturing: A systematic review," *Sustainability*, vol. 12, no. 19, p. 7936, 2020, doi: 10.3390/su12197936.
- [24.] International Organization for Standardization, *Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 5: Digital thread for digital twin, ISO/DIS 23247-5*, 2025. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/87425.html>; and

- National Institute of Standards and Technology (NIST), Digital Thread for Manufacturing, 2025. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/programs-projects/digital-thread-manufacturing>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [25.] M. Sartini, C. Favi, and M. Mandolini, "Rapid investment casting: a techno-economic analysis for evaluating VAT photopolymerisation processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 134, pp. 5717–5739, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14331-y.
- [26.] S. Souvahnakhoomman and A. Chua, "A comprehensive review of generative design applications in unmanned aerial vehicles," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 163–175, 2025, doi: 10.11113/aej.V15.21286.
- [27.] B. Blakey-Milner et al., "Metal additive manufacturing in aerospace: A review," *Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [28.] R. Dehoff et al., "Case study: Additive manufacturing of aerospace brackets," *Advanced Materials & Processes*, p. 1, Mar. 2013. [Online]. Available: <https://scispace.com/pdf/case-study-additive-manufacturing-of-aerospace-brackets-53n5x6c5tb.pdf>. [Accessed: Nov. 3, 2025].
- [29.] L. Thomas-Seale, J. Kirkman-Brown, D. Espino, M. Attallah, and D. Shepherd, "The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry," *International Journal of Production Economics*, vol. 198, pp. 104–118, 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.02.003.
- [30.] A. Ronchini, A. M. Moretto, and F. Caniato, "Adoption of additive manufacturing technology: Drivers, barriers and impacts on upstream supply chain design," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 53, no. 4, pp. 532–554, 2023, doi: 10.1108/IJPDLM-12-2021-0541.
- [31.] L. Suckau, "Additive manufacturing in the military technology sector: Application and proliferation of an emerged technology," *Peace Research Institute Frankfurt (PRIF)*, PRIF Report 3/2025, 2025, doi: 10.48809/prifrep2503.
- [32.] "Drone production in Ukraine: A high-growth investment opportunity," *UA Consulting Blog*, Jun. 8, 2025. [Online]. Available: <https://uaconsulting.eu/2025/06/08/drone-production-in-ukraine/>. [Accessed: Nov. 3, 2025].