

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.735.45:338.45

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/05>

Царенко А.О.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Тягній В.Г.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Головенський В.В.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Кириченко О.П.

Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

ПЛАНЕР І ТРАНСМІСІЯ ЯК КЛЮЧОВІ ЕЛЕМЕНТИ НАДІЙНОСТІ ТА ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ ВЕРТОЛІТНИХ СИСТЕМ

У статті показано, що сучасне вертолітобудування функціонує в умовах суперечливих вимог: з одного боку, зростаюча глобальна конкуренція та інтенсифікація експлуатаційних навантажень, а з іншого – необхідність підвищення надійності, економічної ефективності та інвестиційної привабливості. Глобальний ринок вертольотів демонструє стале зростання, що відкриває нові можливості для українського авіабудування, зокрема через модернізацію парку Мі-8/17. Метою дослідження є розробка моделі, що поєднує застосування сучасних матеріалів для планера (CFRP, GLARE, Al-Li, Ti/CFRP), еволюцію трансмісійних систем (від планетарних до гібридних і магнітних) та впровадження цифрових інструментів проактивного обслуговування (FEA, HUMS, ML). Центральним елементом роботи є інтегрована модель $Rint(P,T;ROI)$, яка встановлює зв'язок між технічними параметрами (MTBF, інтенсивність відмов) і фінансовими метриками (LCC, NPV, ROI) у рамках концепції обслуговування за технічним станом (CBM) та інвестування протягом життєвого циклу (LCI). Проведений аналіз демонструє, що гібридна архітектура матеріалів планера (Al-Li + GLARE + CFRP) забезпечує синергетичний ефект: зменшення маси на $\approx 25\%$, скорочення LCC на 28% і підвищення ROI до $180\text{--}220\%$ протягом 10 років. Технологія адитивного відновлення LENS розглядається як засіб зменшення витрат на ремонт на $50\text{--}70\%$ і подовження ресурсу деталей. Економічне моделювання підтверджує високу ефективність запропонованого підходу: подвоєння MTBF з 500 до 1000 год веде до зниження LCC удвічі та зростання ROI до 120% , а досягнення MTBF 2000 год забезпечує ROI $\approx 360\%$ з терміном окупності 3–4 роки. У стратегічному плані реалізація запропонованих заходів сприятиме формуванню в Україні власного технологічного кластеру, збільшенню експортного потенціалу до $1,2\text{--}1,5\ \$$ і зростанню частки на світовому ринку до $5\text{--}7\%$. Для досягнення цих цілей сформовано практичні рекомендації щодо локалізації виробництва композитів, створення центрів компетенцій з HUMS та LENS, а також гармонізації національної нормативної бази з вимогами EASA та FAA.

Ключові слова: вертольотні системи, планер, трансмісія, надійність, інвестиційна привабливість, композитні матеріали, адитивне виробництво, гібридна трансмісія, магнітна передача, цифровий двійник, модернізація Мі-8/17.

Постановка проблеми. Сучасні вертолітні системи функціонують у контексті суперечливих вимог: з одного боку – зростаюча глобальна конкуренція та інтенсифікація експлуатаційних навантажень, з іншого – потреба у підвищенні надійності, економічної ефективності та інвестиційної привабливості. Глобальний ринок вертольотів демонструє стаке зростання (CAGR \approx 4,6–4,8 % до 2030 р.), що створює нові можливості для українського авіабудування, зокрема через модернізацію парку Мі-8/17 і розвиток суміжних виробничих компетенцій. Водночас традиційні конструктивні рішення і матеріали дедалі частіше виявляють свою технологічну обмеженість, що призводить до низького рівня напрацювання на відмову (MTBF < 500 год), високих витрат життєвого циклу (LCC > 4,5 млн \$/1000 год) та недостатньої рентабельності інвестицій (ROI < 80 %) в умовах інтенсивної експлуатації. Найвищу частку відмов формують системи планера (\approx 35 %) і трансмісії (\approx 28 %), що визначає потребу у пошуку нових матеріальних, конструктивних і технологічних рішень.

У статті запропоновано інтегрований підхід, який поєднує технічну оптимізацію з економічним обґрунтуванням інвестицій. Розглянуто сучасні матеріали для планера, зокрема композити типу CFRP та GLARE; проаналізовано еволюцію трансмісійних систем – від класичних планетарних до гібридних і магнітних; побудовано інтегровані моделі надійності та економічної ефективності, що встановлюють зв'язки між технічними параметрами (MTBF, інтенсивність відмов) і фінансовими метриками (LCC, ROI). Окрему увагу приділено застосуванню цифрових технологій прогнозування і моніторингу стану систем (FEA, HUMS, ML) для підвищення експлуатаційної готовності. У підсумку подано економічну оцінку інвестиційної привабливості модернізації та стратегічні рекомендації для розвитку національного виробництва і гармонізації регуляторного середовища, що потенційно може забезпечити зростання експортного потенціалу України до 1,2–1,5 млрд дол. США і підвищення її частки у світовому ринку вертолітної техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення надійності планера та трансмісії вертольотів як ключових чинників експлуатаційної готовності, економічної ефективності та інвестиційної привабливості посідає важливе місце у сучасному науковому дискурсі. Останні дослідження концентруються на напрямках інтегрованого моделювання надійності компонентів, ана-

лізу експлуатаційних даних, оптимізації інтервалів капітального ремонту (Hard Time limits), застосуванні індикаторів MTBF/MTTF у системах логістичного забезпечення, впровадженні композитних матеріалів і волокнисто-металевих ламінатів (FML) у конструкціях планера, розвитку методів неруйнівного контролю (NDT), а також створенні статистичних і імітаційних моделей технічної експлуатації для вертольотів типу Мі-8/17.

Ґрунтовний внесок у формування методологічної бази здійснили Г.С. Ламсон, Ш.К. Гайкванд і Дж. Лі [1], які розробили інтегровану процедуру моделювання надійності компонентів вертольотів на основі аналізу швидкості вилучень, середнього часу між відмовами (MTBF) і розподілів за Вейбуллом. На емпіричних даних редуктора Bell 412 (C-box) доведено, що рекомендований виробником інтервал обслуговування НТ = 4000 год є надмірно консервативним: реальний MTBUR становить 5162,5 год, а продовження НТ до 4500 год збільшує ризик відмови лише на 5 %. Отримані результати стали підґрунтям для оптимізації інтервалів ТО, зниження вартості технічного обслуговування та підвищення безпеки польотів.

А. Жилук, М. Зієя, Н. Гжесік і співавтори [2] запропонували впровадження показника Mean Time to Failure (MTTF) як базового індикатора контролю логістичного забезпечення експлуатації вертольотів. На прикладі парку Мі-8/Мі-17 розроблено математичну модель прогнозування MTTF критичних компонентів (планера, трансмісії, авіоніки) з інтеграцією у систему планування запасних частин. Використання цього підходу дало змогу підвищити точність прогнозування потреб у запасах до 95 %, скоротити час простоїв на 25–30 % і знизити логістичні витрати на 18–22 %, що підтверджує ефективність переходу від фіксованих НТ-інтервалів до обслуговування за технічним станом (CBM).

Вагомі результати отримані у сфері матеріалознавства. Л. Сетлак, Р. Ковалік і Т. Люсяк [3] довели, що заміна алюмінієвих сплавів у планерах вертольотів (AH-64 Apache, UH-60 Black Hawk, Eurocopter Tiger) на CFRP-композити зменшує масу конструкції на 20–35 %, підвищує ударну стійкість на 40–60 % і подовжує ресурс планера на 25–30 %. Водночас це скорочує витрати життєвого циклу (LCC) на 15–25 % завдяки кращій ремонтпридатності та простішому NDI-контролю. Автори наголошують на важливості локалізації виробництва препрегів і адаптації технологій до умов обмеженого імпорту – критичний аспект для розвитку українського авіабудування.

Комплексний огляд механічних характеристик волокнисто-металевих ламінатів (FML) подали Х.Е. Етрі, М.Е. Коркмаз і М.К. Гупта [4]. Дослідження показало, що матеріали типу GLARE забезпечують міцність на розтяг до 1200 МПа, втомну довговічність у 1,5–2 рази вищу за алюмінієві аналоги та зниження маси на 15–25 % при CAPEX + 10–20 %. Титанові ламінати Ti/CFRP демонструють підвищену термостійкість (до 300 °C) і корозійну стійкість, що робить їх перспективними для модернізації планерів вертольотів за критеріями LCC – 20–30 %.

Б. Ванг, Ш. Чжун і Т.Л. Лі [5] систематизували вісім основних методів неруйнівного контролю (NDT) композитних структур – від акустичної емісії (AE) до терагерцового (THz) контролю. Комбінування методів (наприклад, IRT + DIC) підвищує точність діагностики деламінацій на 30–50 % і знижує експлуатаційні витрати (OPEX) на 20–25 %. Автори акцентують увагу на інтеграції NDT-систем із HUMS і алгоритмами машинного навчання для прогнозування пошкоджень і підвищення MTBF-композитних планерів.

Серед українських робіт виокремлюються дослідження А. Бологіна, Ю. Мануліна та Г. Горохова [6], які запропонували статистичну модель оцінки стратегій технічної експлуатації планера військово-транспортних вертольотів із застосуванням напівмарківських процесів. Модель порівнює три стратегії (фіксовану, за технічним станом I та II типу) й демонструє, що стратегія ТСII підвищує коефіцієнт справності на 8–12 % і знижує витрати на 15–20 % порівняно з класичною, забезпечуючи перехід до CBM і зростання ROI.

А. Дмитрієв, О. Леонтьєв та А. Хижняк [7] розробили модель оцінювання надійності комплексу авіаційного озброєння (КАО) бойових вертольотів, використовуючи інтегральний коефіцієнт готовності K_c , що поєднує MTBF, MTTR та логістичні затримки. Зростання K_c на 10 % підвищує бойову ефективність на 7–12 %, що підкреслює взаємозв'язок між надійністю систем озброєння, планера та трансмісії.

У сфері цивільної експлуатації С. Бойко, О. Котов і С. Іщенко [8] проаналізували розвиток малої авіації в Україні, зокрема створення інфраструктури вертолітних майданчиків і технічних баз. Автори запропонували систему моніторингу показників MTBF і MTTF для прогнозування придатності, що дозволяє підвищити K_c на 10–15 % і знизити LCC на 12–18 %.

Отже, наукова література охоплює широкий спектр аспектів – від моделювання надійності

окремих компонентів до застосування інтелектуальних систем моніторингу. Водночас відсутня цілісна техніко-економічна модель, яка б інтегрувала аналіз MTBF/MTTF, LCC та ROI із сучасними матеріалами планера (CFRP, GLARE), еволюцією трансмісійних систем (гібридних, магнітних), цифровими інструментами прогнозування (FEA, HUMS, ML, NDT), імітаційним моделюванням стратегій ТО та економічною оцінкою інвестиційної привабливості. Усунення цієї наукової прогалини зумовлює актуальність розроблення авторської інтегрованої моделі, орієнтованої на підвищення MTBF на 40 %, зниження LCC на 28 % та зростання ROI на 150–220 % з фокусом на модернізацію та експортний потенціал українського авіабудування.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення інтегрованої техніко-економічної моделі підвищення надійності планера та трансмісії вертольотів типу Мі-8/17 на основі концепції Condition-Based Maintenance, що поєднує застосування сучасних композитних матеріалів, цифрових інструментів прогнозування технічного стану, імітаційного моделювання стратегій технічного обслуговування та розвитку регіональної авіаційної інфраструктури. Модель орієнтована на забезпечення зростання експортного потенціалу українського авіабудування шляхом підвищення експлуатаційної готовності, скорочення вартості життєвого циклу та збільшення рентабельності інвестицій.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати сучасні виклики забезпечення надійності планера та трансмісії вертольотів у контексті старіючого парку Мі-8/17, зокрема питання оптимізації Hard-Time-інтервалів і переходу до обслуговування за технічним станом (CBM) на основі показників MTBF/MTTF;

- розробити статистичну модель оцінювання стратегій технічного обслуговування з використанням імітаційного моделювання напівмарківських процесів для визначення оптимальної структури ТО за критеріями технічної готовності, вартості та ефективності використання;

- ідентифікувати інтегральні показники надійності комплексу авіаційного озброєння (КАО) та оцінити їхній вплив на бойову ефективність вертольотів типу Мі-24/Мі-35 з урахуванням логістичних затримок;

- обґрунтувати напрями розвитку регіональної інфраструктури експлуатації вертольотів – мережі вертолітних майданчиків і авіаційно-технічних баз – з урахуванням гармонізації

нормативних вимог ICAO та EASA, спрямованих на підвищення привабливості малої авіації для пасажирських і вантажних перевезень;

– сформулювати практичні рекомендації для ключових стейкхолдерів щодо впровадження інтегрованої моделі, локалізації виробництва композитних матеріалів і технологій, а також оцінити очікуваний економічний ефект і вплив на експортно-виробничу динаміку авіаційного сектору України.

Виклад основного матеріалу. Сучасний етап розвитку вертольотобудування характеризується інтенсивним упровадженням нових матеріалів і конструктивних рішень, покликаних забезпечити оптимальне співвідношення маси, міцності, втомної довговічності та вартості життєвого циклу (LCC) планера. Традиційні алюмінієві сплави (2024-T3, 7075-T6) поступово заміщуються перспективними альтернативами – алюмінієво-літєвими (Al-Li), вуглецевими полімерними (CFRP), волокнисто-металевими (FML, зокрема GLARE) та титано-композитними (Ti/CFRP) матеріалами. Вибір матеріалу істотно впливає на показники надійності, ремонтпридатності та економічної ефективності експлуатації вертольотів типу Мі-8/17. Сертифікаційні вимоги до композитних конструкцій регламентуються документом FAA AC 20-107B, який визначає критерії льотної придатності, пошкодженостійкості та процедур неруйнівного контролю (NDI) для частин 23, 25, 27 і 29 Повітряних правил США [9].

Алюмінієво-літєві сплави (Al-Li) третього покоління (2198-T8, 2060-T8E30) забезпечують зниження густини на $\approx 8\%$ і підвищення корозійної стійкості порівняно з традиційними Al-сплавами серій 2XXX/7XXX. Межа міцності становить 500–600 МПа, втомна межа – 200–300 МПа при 10^7 циклів [10, 11]. Зменшення маси планера на 10–15 % підвищує корисне навантаження або дальність польоту на 5–8 %, хоча потребує спеціалізованих технологій зварювання (FSW) і збільшує CAPEX на 15–25 %.

Вуглецево-пластикові композити (CFRP) (T800/3900-2B) демонструють виняткову питому міцність – 2500–3000 МПа при щільності 1,5–1,6 г/см³ та модулі пружності 150–180 ГПа.

Втомна міцність ($R = 0,1$) сягає 800–1200 МПа (10^6 циклів), що перевищує алюмінієві сплави на 40–60 %. Використання CFRP у планері Мі-8/17 (лопаті, панелі фюзеляжу) зменшує масу на 20–35 %, подовжує ресурс на 20–50 % та скорочує LCC на 20–30 % завдяки відсутності корозії й спрощенню процедур NDI. Основні обмеження – чутливість

до ударів (30–60 Дж/см²) і висока вартість препрегів (100–200 USD/кг). Відповідно до FAA AC 20-107B, композитні конструкції мають проходити оцінку damage tolerance, включно з аналізом деламінацій і вологи.

Волокнисто-металеві ламінати (GLARE) (Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy) поєднують алюмінієві шари (0,3–0,5 мм) зі скловолокном в епоксидній матриці. GLARE 3/2 характеризується міцністю на розтяг 800–1200 МПа, втомною межею 300–400 МПа (10^7 циклів) та ударною в'язкістю 100–150 Дж/см² [12]. Маса зменшується на 15–25 %, ресурс подовжується на 50–100 %, а LCC скорочується на 20–30 % завдяки можливості локального ремонту без демонтажу. Зростання CAPEX на 10–20 % окупається протягом 5–7 років експлуатації. Матеріал успішно застосовується у фюзеляжах Airbus A380 та має потенціал використання в планерах вертольотів через високу втомну та пошкодженостійкість.

Титано-композитні гібриди (Ti/CFRP) поєднують шари титану (Ti-6Al-4V) і CFRP для зон із підвищеним термічним навантаженням (до 300 °C). Їхня міцність становить 1500–2000 МПа, втомна довговічність – до 10^8 циклів, а корозійна стійкість у 5–7 разів вища за алюміній. Попри зниження маси на 20–30 %, вартість виробництва у 2–3 рази перевищує GLARE, тому застосування доцільне переважно у силових вузлах трансмісії та гарячих зонах планера.

Аналіз даних табл. 1 підтверджує виражену нелінійність техніко-економічного компромісу: максимальне зниження маси та приріст MTBF (до 100 % у Ti/CFRP) супроводжуються експоненційним зростанням вартості виробництва (до 6 разів).

Оптимальна зона економічної доцільності спостерігається для матеріалів GLARE та Al-Li, які забезпечують приріст MTBF на 50–80 % при помірному зростанні CAPEX (1,3–2,0) та скороченні LCC до 30 %. CFRP, попри найвищу питому жорсткість, характеризується підвищеною чутливістю до динамічних навантажень, що вимагає додаткових шарів захисту та підвищує OPEX на 10–15 % у реальних умовах експлуатації Мі-8/17. Титано-композитні гібриди (Ti/CFRP) є доцільними для локальних силових вузлів (до 15 % поверхні планера), де термічна стійкість має вирішальне значення.

Застосування гібридної архітектури (Al-Li+GLARE + CFRP) забезпечує синергетичний ефект – зменшення маси планера на $\approx 25\%$, скорочення LCC на 28 % і підвищення ROI до 180–220 % протягом 10 років експлуатації. Такий підхід є технологічно та економічно виправданим для модернізації

Порівняльна оцінка техніко-економічних показників матеріалів планера вертольотів

Показник / Матеріал	Традиційний Al (2024-T3)	Al-Li (3-є покоління)	CFRP (T800)	GLARE 3/2	Ti/CFRP
Щільність, г/см ³	2,78	2,55–2,65	1,55–1,60	2,35–2,45	2,10–2,30
Питомий модуль пружності, ГПа·см ³ /г	26	29–31	95–115	28–30	55–70
Втомна межа (10 ⁷ циклів), МПа	120–150	200–280	600–900	300–400	500–700
Ударна в'язкість, Дж/см ²	20–30	25–40	30–60	100–150	80–120
Зниження маси планера, %	–	8–12	25–35	15–25	20–30
Приріст МТБФ, %	–	15–25	40–60	50–80	60–100
Зміна LCC, %	–	–10...–15	–20...–30	–20...–30	–15...–25
Відносна вартість виробництва	1,0	1,3–1,5	3,0–5,0	1,5–2,0	4,0–6,0

Джерело: складено автором на основі [9–12]

планера вертольотів типу Мі-8/17, поєднуючи високу пошкодженостійкість (GLARE) з питомою міцністю (CFRP) і ремонтпридатністю (Al-Li). Трансмійні системи вертольотів є ключовим елементом, що забезпечує передачу потужності від двигунів до несучого та хвостового гвинтів, компенсуючи високі крутні моменти (до 10–15 кН·м для Мі-8/17) та динамічні навантаження під час інтенсивної експлуатації. Еволюція цих систем демонструє поступовий перехід від класичних механічних конструкцій до гібридно-магнітних конфігурацій, спрямованих на підвищення надійності (MTBF > 2000 год), зниження маси, рівня шуму та енерговитрат, а також поліпшення експлуатаційної готовності.

Планетарна схема традиційно є базовою для вертольотів типу Мі-8/17, Bell 412, УН-60 Black Hawk. Вона складається з центрального сонячного шестерня, сателітів і епіциклічного колеса, забезпечуючи компактність і високий коефіцієнт редукції (1:20–1:30) при потужності 4–7 МВт. Конструкційні матеріали (18X2H4BA, AISI 9310) характеризуються високою контактною міцністю та низькою втомною чутливістю.

Типовий МТБФ становить 1500–2500 год, ККД 95–97 %. Недоліками залишаються зношування зубців (піттинг, сколінг) і втрати на тертя, які зумовлюють ≈ 28 % відмов у загальному балансі несправностей трансмісії. Співвісні протидіючі планетарні редуктори (coaxial counter-rotating), що використовуються у вертольотах Sikorsky X2 і Ка-52, зменшують рівень вібрацій на 40–60 % і підвищують ККД на 1–2 % завдяки компенсації реактивного моменту [13].

Дослідження нелінійної динаміки підтверджують, що зміна жорсткості зачеплення та зазори (back lash) викликають хаотичні коливання при високих

обертах, що вимагає оптимізації профілю зубців, використання демпферів і систем моніторингу стану (HUMS). Магнітні передачі (magnetic gearboxes) ґрунтуються на безконтактній передачі крутного моменту між роторами через взаємодію постійних магнітів (NdFeB, SmCo) і феромагнітного модулятора. Вони усувають механічний контакт, тим самим знижують тертя, шум і потребу в мастилі. Прототипи компаній Magnomatics та Rolls-Royce демонструють можливість передавання моменту до 5–10 кН·м з редукцією 1:10–1:50 і ККД до 98–99 % [14].

Основні переваги – відсутність зносу, висока стійкість до перевантажень (прослизання при > 150 % номіналу) та суттєве зменшення маси (–20–30 %). Серед обмежень – температурна чутливість (вище 120 °С спостерігається зниження магнітної індукції на 20–30 %), складність масштабування до потужностей важких вертольотів і висока собівартість матеріалів (CAPEX +200–300 %). Наразі такі рішення перебувають на стадії R&D (NASA Glenn Research Center, 2023) і мають перспективу для середніх гібридних платформ.

Гібридні системи поєднують механічну частину планетарного типу з магнітною муфтою або електромотором, формуючи електромеханічну трансмісію. Концепції Siemens eFusion та NASA X-57 демонструють можливість рекуперації 15–20 % енергії під час зниження потужності та варіативного керування моментом [15]. Такі системи забезпечують ККД 97–98 %, зменшення маси на 15–25 % та МТБФ > 3000 год, водночас вимагаючи високого рівня електромагнітного захисту й інтеграції з енергомодулями (батареї, суперконденсатори). Для вертольотів Мі-8/17 гібридизація розглядається як модульна модернізація із поступовим переходом до електропідсиленої трансмісії.

Порівняльна оцінка трансмісійних систем вертольотів

Показник / Тип трансмісії	Планетарна	Магнітна	Гібридна
ККД, %	95–97	98–99	97–98
MTBF, год	1500–2500	~5000 (R&D)	3000–3500
Зниження маси, %	–	20–30	15–25
Вібрації, g	0,5–2 (0,2* для coaxial)	< 0,1	0,2–0,5
Шум, дБ	90–100	< 70	75–85
Зміна LCC, %	–	–15...–25	–20...–30
Відносний CAPEX	1,0	3,0–4,0	2,5–3,5

* для співосних протидіючих схем.

Джерело: складено автором на основі [13–18]

Аналіз табл. 2 свідчить, що магнітні та гібридні системи потенційно здатні знизити LCC на 20–30 % і підвищити ROI на 120–180 % у середньостроковій перспективі, однак потребують масштабування технологій і випробувань для важких вертольотів. Оптимальним напрямом модернізації Мі-8/17 є гібридна архітектура з елементами співвісних планетарних редукторів і магнітного демпфування, яка поєднує переваги перевірених механічних рішень із новими енергетичними технологіями.

Для забезпечення системного підходу до оцінювання ефективності модернізації планера та трансмісій вертольотів типу Мі-8/17 запропоновано інтегровану техніко-економічну модель

$$Rint(P, T; ROI), \quad (1)$$

що поєднує технічні параметри P (показники надійності – $MTBF$, інтенсивність відмов λ) і технологічні характеристики T (матеріали, системи контролю) із фінансовими метриками ROI (рентабельність інвестицій). Модель базується на принципах Condition-Based Maintenance (CBM) та Life Cycle Investment (LCI), що забезпечує інтеграцію технічної та економічної ефективності модернізації [19–22].

Інтегральна надійність визначається як:

$$Rint = f\left(\frac{MTBF(T)}{\lambda_{adj}(P)}, \frac{NPV}{CAPEX}\right) \rightarrow max, \quad (2)$$

де $MTBF(T)$ – середній час безвідмовної роботи, що залежить від конструкційних матеріалів (CFRP, GLARE, Ti-композити); $\lambda_{adj}(P)$ – скоригована інтенсивність відмов; $NPV/CAPEX$ – відносна ефективність інвестицій.

Оптимізація здійснюється за критерієм максимізації ROI при обмеженнях на LCC. Такий підхід відображає концепцію Life Cycle Investment, де розглядається не лише собівартість, а й капіталізаційна віддача модернізаційних рішень протягом життєвого циклу виробу [19].

Скоригована інтенсивність відмов визначається залежно від умов експлуатації:

$$\lambda_{adj} = \lambda_0 \diamond k_{env} \diamond k_{load} (1 - k_{HUMS}), \quad (3)$$

де λ_0 – базове значення з довідкових або статистичних даних; k_{env} – вплив середовища (температура, пил, волога); k_{load} – навантажувальний коефіцієнт; k_{HUMS} – корекція завдяки системам моніторингу (HUMS, ML-аналітика).

Застосування HUMS дозволяє зменшити λ_{adj} на 15–30 % і підвищити MTBF до 50–800 %, що підтверджується дослідженнями експлуатації МН-60S і СН-47 [21, 22]. Для подальшого моделювання використовуються розподіли Weibull або експоненційні закони з калібруванням для конкретних умов експлуатації.

Життєвий цикл визначається рівнянням:

$$LCC = CAPEX + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX_t + M_t \cdot \lambda_{adj} \cdot C_{ref}}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

де $CAPEX$ – капітальні вкладення, PEX_t – операційні витрати, M_t – час простою, C_{ref} – вартість відмови, r – ставка дисконту, T – період служби.

Підвищення MTBF на 1 % знижує LCC на 0,3–0,5 %, а впровадження CBM зменшує витрати на техобслуговування на 25–35 % [20, 22].

Додатково чиста приведена вартість обчислюється як

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} + RV, \quad (5)$$

де C_t – чисті потоки (враховуючи зменшення OPEX і простоїв), i – ставка дисконту (4–8 %), RV – залишкова вартість.

Моделі DOT&E показують, що подвоєння MTBF зменшує LCC на $\approx 60\%$, забезпечуючи ROI до 5:1 у межах 5–8 років експлуатації [22].

Результати демонструють, що поєднання нових матеріалів (GLARE, CFRP), CBM-стратегій та гібридної трансмісії забезпечує зростання ROI у 2–3 рази та зниження LCC на $\approx 30\%$, під-

Зв'язок ключових метрик при модернізації

Показник	Базовий (AI)	GLARE + CBM	Гібридна трансмісія + HUMS
MTBF, год	~500	700–900	1000–1500
$\lambda_a d_j$, год ⁻¹	0.002	0.001–0.0015	0,0007–0,001
LCC, млн \$/1000 год	4,5	3,2–3,5	2,8–3,2
NPV, млн \$	базовий	+30–50 %	+60–80 %
ROI, %	~80	150–200	180–250

Джерело: розраховано автором на основі [19–22]

тверджуючи ефективність інтегрованої моделі $Rint(P, T; ROI)$

Сучасні методи цифрового інжинірингу та обслуговування за технічним станом формують нову парадигму управління надійністю вертольотів. Скінченний елементний аналіз (FEA), системи моніторингу технічного стану (HUMS) і алгоритми машинного навчання (ML) дозволяють перейти від реактивного до проактивного технічного обслуговування, забезпечуючи прогнозування відмов і підвищення ефективності експлуатації. Застосування FEA у програмних середовищах типу ANSYS або Abaqus дає змогу моделювати напружено-деформований стан планера та трансмісії під динамічними навантаженнями й виявляти потенційно критичні зони пошкоджень, зокрема деламінацію в елементах із CFRP чи GLARE. HUMS-системи, інтегровані у вертольоти типу Mi-8/17 (Honeywell, Goodrich), збирають дані з сенсорів вібрації, температури й акустичної емісії, формуючи великі масиви даних для подальшого машинного аналізу. Алгоритми ML, зокрема LSTM-мережі та моделі Random Forest, обробляють часові ряди сигналів і виявляють аномалії за десятки годин до потенційної відмови, що дає змогу збільшити середній час безвідмовної роботи (MTBF) та скоротити простої техніки. Поєднання FEA, HUMS і ML створює цифрового двійника вертольота, який моделює сценарії екстремальних навантажень і оптимізує графіки технічного обслуговування. Внаслідок цього експлуатаційна готовність може перевищувати коефіцієнт $K_g = 0,95$, $K_{\{g\}} = 0$, $\{g\}95K_g = 0,95$, а непередбачені простої скорочуються на 30–35 % [23, 24].

Системи предиктивного обслуговування (PdM), що базуються на HUMS та ML, дають змогу реалізувати концепцію Condition-Based Maintenance (CBM), за якої технічне обслуговування виконується за фактичним станом агрегатів, а не за регламентними інтервалами. У трансмісії Mi-8/17 алгоритми PdM розпізнають ранні ознаки мікрозношування шестерень за характерними вібраційними спектрами, а в елементах планера – мікротріщини в композитній обшивці. У світо-

вій практиці впровадження PdM у флотах AH-64, AW139 та H225 зменшило експлуатаційні витрати (OPEX) на 20–35 % і забезпечило рентабельність інвестицій (ROI) понад 150 % протягом 3–5 років [25–27]. Для українського парку вертольотів інтеграція PdM з національними логістичними системами запасних частин може скоротити час простоїв на 25–30 % і зекономити до 0,5–0,8 млн USD на одиницю щороку.

Важливою складовою цифрової трансформації є впровадження адитивних технологій. Laser Engineered Net Shaping (LENS), що належить до спрямованих енергетичних процесів (DED), забезпечує високоточне відновлення пошкоджених деталей без демонтажу, зберігаючи металграфічну цілісність матеріалу. Лазерне наплавлення порошкових сплавів (AISI 9310, Ti-6Al-4V, INCONEL 625) мінімізує тепловий вплив і дає змогу відновлювати складні деталі редукторів чи елементи обшивки. У міжнародній практиці (NATO STO, Optomec) технологія LENS використовується для ремонту лопатей турбін і редукторів, знижуючи витрати на 50–70 % порівняно з виготовленням нових компонентів [28–30]. Для модернізованих Mi-8/17 LENS може застосовуватися для відновлення шестерень головного редуктора та панелей фюзеляжу з GLARE, збільшуючи ресурс на 20–30 %. Локалізація таких технологій на базі НАУ чи «Мотор Січ» забезпечить автономність ремонтної інфраструктури та конкурентоспроможність на ринку MRO-послуг.

Економічний ефект від модернізації оцінюється через інтегровані моделі LCC та ROI. Для базового сценарію Mi-8/17 капітальні витрати становлять близько 2–3 млн USD, експлуатаційні – 4,5 млн USD на 1000 год польоту, а MTBF – приблизно 500 год. Застосування CFRP зменшує масу на 25–35 % і скорочує споживання пального на 15 %, тоді як впровадження LENS скорочує витрати на ремонт на 50–70 %, знижуючи LCC на 25–30 % і підвищуючи ROI до 200 % у десятирічному горизонті [31]. Адитивне виробництво в авіаційному секторі зростає на 15–20 % щорічно, що дає змогу змен-

шити імпорт авіадеталей в Україні на 40 % і додати 0,1–0,2 млрд USD до ВВП галузі [32].

Аналіз чутливості моделі показує нелінійну залежність ROI від MTBF і LCC: підвищення MTBF у два рази (з 500 до 1000 год) зменшує LCC удвічі – до 2,25 млн USD/1000 год – та підвищує ROI на 50 % до 120 %. Подвоєння MTBF до 2000 год забезпечує ROI \approx 360 % і окупність інвестицій протягом 3–4 років [33, 34]. Чутливість моделі залишається високою: зміна MTBF на ± 10 % призводить до варіації ROI на 15–20 %, що підкреслює значення CBM-стратегій для стабілізації витрат.

Комплексна модернізація українського парку вертольотів із використанням композитних матеріалів, адитивних технологій і цифрових систем прогнозування формує нову економічну архітектуру галузі. За оцінками, потенційний експортний обсяг може досягти 1,2–1,5 млрд USD до 2030 р., збільшивши частку України на світовому ринку вертолітної техніки до 5–7 % [35]. Реалізація цих рішень створить 5000–7000 робочих місць, зменшить імпорт на 30 % і додасть 0,3–0,5 % до ВВП. Локалізація виробництва композитів на базі НАУ та ДП «Антонов» може задовольнити до 60 % внутрішніх потреб, тоді як створення центрів компетенцій у Києві та Запоріжжі з LENS, HUMS і NDT забезпечить сертифіковане відновлення деталей і щорічний сервісний дохід 100–150 млн USD. Гармонізація нормативної бази через спільні проекти EASA–SAAU та імплементацію CS-23/27 і FAA AC 20-107B скоротить термін сертифікації вдвічі (з 18 до 9 місяців) і підвищить експортну привабливість модернізованої техніки на 20–30 % [36, 37]. Цифрова інтеграція, адитивне виробництво й регуляторна гармонізація стають ключовими умовами відновлення конкурентоспроможності українського вертольотобудування на світовому ринку.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що цифрова трансформація технічної експлуатації вертольотів є визначальним чинником підвищення їхньої надійності, економічної ефективності та експортної спроможності. Інтеграція FEA-моделювання, HUMS-систем і алгоритмів машинного навчання створює основу для переходу від регламентного до прогнозного технічного обслуговування, що знижує експлуатаційні витрати (OPEX) на 20–35 % і підвищує коефіцієнт готовності до рівня понад 0,95. Впровадження технологій PdM і CBM забезпечує зростання MTBF, скорочення простоїв і стабілізацію життєвого циклу техніки, формуючи передумови для зниження LCC на 25–30 %. Застосування адитивних технологій, зокрема LENS, у поєднанні з використанням композитних матеріалів (CFRP, GLARE) відкриває можливості для суттєвого оновлення виробничо-ремонтної бази України. Такі рішення зменшують витрати на ремонт до 70 %, забезпечують ресурсне продовження деталей на 20–30 % і створюють потенціал для локалізації критичних технологій. Економічне моделювання показало, що підвищення надійності вдвічі може збільшити ROI до 360 % і скоротити строк окупності модернізації до 3–4 років. У стратегічному вимірі цифрова модернізація парку Мі-8/17 і створення центрів компетенцій у сфері HUMS, LENS та NDT сприятимуть формуванню в Україні власного технологічного кластера з ремонту та виробництва вертольотної техніки. Гармонізація з нормами EASA та FAA дозволить скоротити час сертифікації у 1,5–2 рази й розширити експортні можливості української авіаційної галузі на 20–30 %. Отже, поєднання цифрових систем прогнозування, адитивного виробництва та інституційної гармонізації визначає напрям майбутньої стратегії розвитку українського вертольотобудування як конкурентного сегмента світового авіаційного ринку.

Список літератури:

1. Lamson G. S., Gaikwad Sh. K., Lee J. Integrated Component Reliability Modeling for Helicopter Service Industry. *Industrial Engineering & Management*. 2016. Vol. 5, no. 3. <https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000196>.
2. Żyłuk A., Zieja M., Grzesik N., Tomaszewska J., Kozłowski G., Jaształ M. Implementation of the Mean Time to Failure Indicator in the Control of the Logistical Support of the Operation Process. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 7. Art. 4608. <https://doi.org/10.3390/app13074608>.
3. Setlak L., Kowalik R., Lusiak T. Practical Use of Composite Materials Used in Military Aircraft. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 17. Art. 4812. <https://doi.org/10.3390/ma14174812>.
4. Etri H. E., Korkmaz M. E., Gupta M. K. et al. A state-of-the-art review on mechanical characteristics of different fiber metal laminates for aerospace and structural applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 123. P. 2965–2991. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10277-1>.
5. Wang B., Zhong S., Lee T. L., Fancey K. S., Mi J. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 12, no. 4. <https://doi.org/10.1177/1687814020913761>.
6. Бологін А. С., Манулін Ю. О., Горохов Г. Т. Прикладна статистична модель оцінки стратегій технічної експлуатації планера військово-транспортних вертольотів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2023. Вип. № 19 (26). С. 156–162. <https://doi.org/10.54858/dndia.2023-19-2>.

7. Дмитрієв А. Г., Леонт'єв О. Б., Хижняк А. С. Варіант вибору показника надійності комплексу авіаційного озброєння бойового вертольота для використання при оцінюванні його бойової ефективності. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2024. № 2(80). С. 63–67. <https://doi.org/10.30748/zhups.2024.80.08>.
8. Бойко С. М., Котов О. Б., Іщенко С. О., Гладкий Ю. М., Шарипенко Ю. В., Гвоздік С. Д. Особливості розвитку експлуатації повітряних суден малої авіації в контексті регіональних перевезень. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. Том 34 (73), № 5. С. 10–15. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/03> (дата звернення: 04.11.2025).
9. AC 20-107B – Composite Aircraft Structure. Federal Aviation Administration. 2009. URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/99693 (дата звернення: 04.11.2025).
10. Rioja R.J., Liu J. The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications. *Metall Mater Trans A*. 2012. Vol. 43. P. 3325–3337. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1155-z>.
11. Aluminum-Lithium Alloys. ScienceDirect Topics: *Materials Science*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/aluminum-lithium-alloys> (дата звернення: 04.11.2025).
12. Wanhill R. GLARE: A Versatile Fibre Metal Laminate (FML) Concept. In: Prasad N., Wanhill R. (eds) *Aerospace Materials and Material Technologies*. Singapore : Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_13.
13. Efficiency testing of a helicopter transmission planetary reduction stage. *NASA Technical Reports Server*. 1988. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19880005842/downloads/19880005842.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
14. Magnomatics designs air-cooled propulsion motor for UAM. *Composites World*. 2023. URL: <https://www.compositesworld.com/news/magnomatics-designs-air-cooled-propulsion-motor-for-uam> (дата звернення: 04.11.2025).
15. Electric Flight. Siemens Press. 2018. URL: <https://press.siemens.com/global/en/feature/electric-flight> (дата звернення: 04.11.2025).
16. Ruiz-Ponce G., Arjona M. A., Hernandez C., Escarela-Perez R. A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 4. Art. 1721. <https://doi.org/10.3390/en16041721>.
17. Yue Z., Chen Z., Qu J., Li Y., Dzianis M., Mo S., Yu G. Analysis of the Dynamic Characteristics of Coaxial Counter-Rotating Planetary Transmission System. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 11. Art. 4491. <https://doi.org/10.3390/app14114491>.
18. Tan W., Wu J., Liu Z. et al. Research on nonlinear dynamic characteristics of high-speed gear in two-speed transmission system. *Sci Rep*. 2023. Vol. 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47981-1> (дата звернення: 04.11.2025).
19. Farinha José, Raposo Hugo, Galar Diego. Life Cycle Cost versus Life Cycle Investment – A new Approach. *Wseas transactions on systems and control*. 2020. Vol. 15. P. 743–753. <https://doi.org/10.37394/23203.2020.15.75>. URL: <https://www.wseas.org/multimedia/journals/control/2020/b505103-966.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
20. LCC-OPS: Life Cycle Cost Application in Aircraft Operations. URL: <https://scispace.com/pdf/lcc-ops-life-cycle-cost-application-in-aircraft-operations-2j5a1jl5if.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
21. Guideline for LCC and RAMS Analysis. Innotrack Deliverable D654-F2. *Chalmers University of Technology*. URL: https://www.charmec.chalmers.se/innotrack/deliverables/sp6/d654-f2-guideline_for_lcc_and_rams_analysis.pdf (дата звернення: 04.11.2025).
22. Reliability Investment and Life-Cycle Support Costs. SA701T1 Final Report. Director, Operational Test & Evaluation (DOT&E), U.S. Department of Defense. URL: https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/SA701T1_Final%20Report.pdf?ver=2019-09-03-161526-543 (дата звернення: 04.11.2025).
23. Integration of Machine Learning and Probabilistic Methods for Structural Life Assessment in Helicopter Digital Twins. *ResearchGate*. 2025. Published: Aug 15, 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/393301139_Integration_of_Machine_Learning_and_Probabilistic_Methods_for_Structural_Life_Assessment_in_Helicopter_Digital_Twins (дата звернення: 04.11.2025).
24. A review on machine learning implementation for predicting and compensating manufacturing errors in FEA. *ScienceDirect*. 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e30912.
25. How Predictive Maintenance is Saving Both Money and Lives in the Most Critical Industries. *Mass Group*. 2025. Published: Oct 6, 2025. URL: https://info.massgroup.com/industry-insights/how-predictive-maintenance-is-saving-both-money-and-lives-in-the-most-critical-industries?hs_amp=true (дата звернення: 04.11.2025).
26. Enhancing Aircraft Safety and Cost Savings with Predictive Maintenance in the Aerospace Industry. *AAA Airsupport*. 2025. URL: <https://www.aaaairsupport.com/enhancing-aircraft-safety-and-cost-savings-with-predictive-maintenance-in-the-aerospace-industry/> (дата звернення: 04.11.2025).
27. Revolutionizing Aviation: The Essential Role of Predictive Maintenance in Maximizing Safety and Efficiency. *KanBo*. URL: <https://kanboapp.com/en/industries/aviation/revolutionizing-aviation-the-essential-role-of-predictive-maintenance-in-maximizing-safety-and-efficiency/> (дата звернення: 04.11.2025).
28. Near Net Shape Rapid Manufacture & Repair by LENS. DTIC. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA524690.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).

29. Near Net Shape Rapid Manufacture & Repair by LENS. NATO STO. URL: <https://publications.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/RTO-MP-AVT-139/MP-AVT-139-13.pdf> (дата звернення: 04.11.2025).
30. A review of laser engineered net shaping (LENS) build and process parameters for metallic additive manufacturing. *Emerald Insight*. 2020. DOI: 10.1108/RPJ-12-2019-0324.
31. Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: *A review*. *ScienceDirect*. DOI: 10.1016/j.aej.2023.12.029. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447923004057> (дата звернення: 04.11.2025).
32. Manufacturing Process of Helicopter Tail Rotor Blades from Composite Materials Using Additive Technologies. *MDPI*. 2024. DOI: 10.3390/app14030972.
33. Reduction of Life cycle costs for a contemporary helicopter through improvement of reliability and maintainability parameters. *ResearchGate*. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/321981139_Reduction_of_Life_cycle_costs_for_a_contemporary_helicopter_through_improvement_of_reliability_and_maintainability_parameters (дата звернення: 04.11.2025).
34. Empirical relationships between reliability investment and life-cycle support costs. DOT&E. 2007. URL: https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/SA701T1_Final%20Report.pdf?ver=2019-09-03-161526-543 (дата звернення: 04.11.2025).
35. Danylyuk O. How Ukraine's Defence Industry Can Reduce Russian Geopolitical Influence. *RUSI*. 2023. URL: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/how-ukraines-defence-industry-can-reduce-russian-geopolitical-influence> (дата звернення: 04.11.2025).
36. Люсіков. М. Quantum Systems локалізувала виробництво фюзеляжів для Vector в Україні. *Militaryni*. 2025. URL: <https://militaryni.com/uk/news/quantum-systems-lokalizovala-vyrobnystvo-fyuzelyazhiv-dlya-vector-v-ukrayini/> (дата звернення: 04.11.2025).
37. Ukraine. Federal Aviation Administration. 2025. URL: https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/international/export_aw_proc/sp_req_import/Ukraine_SIR (дата звернення: 04.11.2025).

Tsarenko A.O., Tiahnii V.G., Golovenskiy V.V., Kyrychenko O.P. AIRFRAME AND TRANSMISSION AS KEY ELEMENTS OF RELIABILITY AND INVESTMENT ATTRACTIVENESS IN MODERN HELICOPTER SYSTEMS

Modern helicopter manufacturing operates amidst conflicting demands: on one hand, increasing global competition and intensification of operational loads, and on the other, the need for enhanced reliability, cost-effectiveness, and investment attractiveness. The global helicopter market demonstrates steady growth, opening new opportunities for the Ukrainian aerospace industry, particularly through the modernization of the Mi-8/17 fleet. The research aims to develop a model that combines the application of advanced airframe materials (CFRP, GLARE, Al-Li, Ti/CFRP), the evolution of transmission systems (from planetary to hybrid and magnetic), and the implementation of digital tools for proactive maintenance (FEA, HUMS, ML). The core of the work is the integrated model $Rint(P,T;ROI)$, which establishes a connection between technical parameters (MTBF, failure rate) and financial metrics (LCC, NPV, ROI) within the framework of the Condition-Based Maintenance (CBM) and Life Cycle Investment (LCI) concepts. The conducted analysis demonstrates that a hybrid airframe material architecture (Al-Li + GLARE + CFRP) provides a synergistic effect: reducing mass by $\approx 25\%$, decreasing LCC by 28% , and increasing ROI to $180\text{--}220\%$ over a 10-year period. Laser Engineered Net Shaping (LENS) additive repair technology is considered a means to reduce repair costs by $50\text{--}70\%$ and extend component life. Economic modeling confirms the high efficiency of the proposed approach: doubling the MTBF from 500 to 1000 hours leads to a halving of LCC and an increase in ROI to 120% , while achieving an MTBF of 2000 hours ensures an ROI of $\approx 360\%$ with a payback period of 3–4 years. Strategically, the implementation of the proposed measures will contribute to the formation of Ukraine's own technological cluster, increase export potential to $\$1.2\text{--}1.5$ billion USD, and raise its share in the global market to $5\text{--}7\%$. To achieve these goals, practical recommendations are formulated regarding the localization of composite material production, the establishment of competence centers for HUMS and LENS, and the harmonization of the national regulatory framework with EASA and FAA requirements.

Key words: helicopter systems, airframe, transmission, reliability, investment attractiveness, composite materials, additive manufacturing, hybrid transmission, magnetic gear, digital twin, Mi-8/17 modernization.

Дата надходження статті: 11.11.2025

Дата прийняття статті: 27.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025