

УДК 623.76:623.4.017:629.1

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).131-136](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).131-136)

І. І. ЗАЛІСКО, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-8353-9524>
(Дрогобицький завод автомобільних кранів,
м. Дрогобич)

С. М. ГІМБЕР, інженер
<https://orcid.org/0000-0002-7616-3944>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, м. Київ)

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МОБІЛЬНИХ КРАНІВ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ШАСІ ДЛЯ УМОВ АКТИВНИХ БОЙОВИХ ДІЙ: СТРУКТУРНА НАДІЙНІСТЬ, БАЛІСТИЧНИЙ ЗАХИСТ І ЖИВУЧИСТЬ

У статті обґрунтовується актуальність і науково-практична значущість нового дослідницького напрямку – системного аналізу мобільних кранів на автомобільному шасі як бойових технічних систем в умовах БПЛА-насиченого простору протиборства. На основі аналізу чотирьох тематичних кластерів рецензованої літератури встановлено системний розрив між академічними досягненнями у галузях механіки конструкцій, балістичного матеріалознавства, теорії управління та військової аналітики і відсутністю синтезуючого міждисциплінарного підходу до опису крана як єдиної бойової системи. Виявлено п'ять ключових наукових протиріч, що формують наукову проблему дослідження. На основі досвіду збройного конфлікту в Україні 2022–2026 рр. охарактеризована трансформація загроз для неброньованої інженерної техніки з боку FPV-БПЛА і показана принципова нерозв'язаність цієї проблеми в межах будь-якої окремої дисципліни. Запропоновано структуру чотирьохмодульної дослідницької програми з визначенням наукових завдань, методів і цільових журналів для публікацій. Стаття обґрунтовує актуальність і проблематику нового дослідницького напрямку.

Ключові слова: мобільний кран, бойова технічна система, балістичний захист, STANAG 4569, FPV-БПЛА, структурна надійність, телескопічна стріла, дистанційне управління, живучість, інженерне озброєння.

ВСТУП І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний збройний конфлікт в Україні є першим великомасштабним протистоянням, у якому безпілотні літальні апарати (БПЛА) першої особи (FPV – First Person View) і барражуючі боєприпаси стали відповідальними за більшість технічних втрат обох сторін. За оцінками незалежних аналітиків, що спираються на верифіковану відео документацію, FPV-дрони забезпечують понад 65 % підтверджених втрат бронетехніки у 2024...2025 рр. [1]. Ці дані свідчать щодо принципової зміни тактичного середовища: ефективне ведення бойових дій більше не гарантується традиційними стандартами бронезахисту, що розроблені у другій половині ХХ ст.

У цьому контексті особливої уваги набуває клас військової техніки, що донедавна вважався виключно засобом тилового інженерного забезпечення – мобільні крани на автомобільному шасі. В Збройних Силах України (ЗСУ) ці машини, зокрема серія КТА (Крани Телескопічні Автомобільні), систематично використовуються для наведення переправ і мостів, монтажу фортифікаційних споруд, евакуації пошкодженої бронетехніки та будівництва захисних позицій – безпосередньо у прифронтовій зоні. Виконання цих завдань вимагає тривалої (30...120 хв.) нерухомості машини у визначеній точці, тоді як насиченість ближніх і середніх дистанцій розвідувальними і ударними БПЛА перетворює кран на статичну ціль у перманентно спостережуваному просторі.

Незважаючи на очевидну операційну значущість цього класу техніки, системне академічне дослідження, що описує мобільний кран як бойову систему з кількісно визначеним профілем конкуруючих параметрів виживання, захисту, конструктивної надійності і управління, у відкритій науковій літературі відсутнє. Рецензований публікаційний масив охоплює відповідні теми лише фрагментарно і дисциплінарно ізольовано: роботи з оптимізації стрілових конструкцій [2–4] не враховують польових режимів навантаження; дослідження балістичних матеріалів для бойових машин [5, 6] не розглядають специфічного компромісу між масою броні і підйомним потенціалом крана; теорія управління кранами [7–9] не інтегрує умов РЕБ-деградованого середовища; і жодна з військово-аналітичних праць не формалізує ризик ураження оператора неброньованого крана як функцію тактичних параметрів.

Метою цієї статті є: (а) систематизувати наявні дослідницькі кластери і виявити їх методологічні обмеження; (б) сформулювати наукові протиріччя і наукову проблему дослідження; (в) обґрунтувати структуру та зміст єдиної дослідницької програми, спрямованої на заповнення виявленого системного розриву.

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ І ВИЯВЛЕННЯ ДОСЛІДНИЦЬКИХ КЛАСТЕРІВ

Систематичний огляд публікацій за чотирма тематичними напрямками дозволяє виявити структуру наявного знання і окреслити її межі.

Структурна оптимізація стрілових систем і аутригерів (Кластер 1)

Публікаційна база з оптимізації несучих конструкцій кранів є технічно зрілою і охоплює три хвилі методо-

логічного розвитку. Перша хвиля – детерміністична оптимізація мінімізації маси при обмеженнях на напруження і прогин методом скінченних елементів (МСЕ): зокрема, параметрична МСЕ-модель дозволила знизити масу телескопічної стріли автокрана на 24,3 % при збереженні нормативних параметрів [2]. Друга хвиля – надійнісно-орієнтоване проектування (RBDO): інтеграція методу поверхні відклику з багатоострівним генетичним алгоритмом (MIGA) скорочує обчислювальні витрати RBDO приблизно втричі [3]. Третя хвиля – багатоцільова оптимізація з гібридними сурогатними моделями RSM-RBFNN і алгоритмом NSGA-II, що формує Парето-фронт із 147 недомінованими рішеннями для телескопічної стріли спеціальних транспортних засобів [4].

Принципова вада всього масиву: режими навантаження у всіх роботах відповідають стандартам ISO 4301 і EN 13000, що регламентують квазістатичні підйомні операції у цивільних умовах. Жодна з праць не враховує ударних збурень від руху бездоріжжям, вібраційних збурень у польових умовах або ударних хвиль від близьких підривів. Між тим поєднання зазначених збурень з підйомним навантаженням формує якісно новий режим, для якого цивільні оптимальні конструкції можуть мати суттєво знижений ресурс.

Балістичний захист і матеріальний компроміс (Кластер 2)

Стандарт STANAG 4569 (NATO AEP-55) визначає шість рівнів балістичного захисту для броньованих автомобілів від 7,62 мм (рівень 1) до 30 мм APFSDS (рівень 6) і встановлює вимоги до комплексного захисту від кінетичних загроз, артилерійських осколків і підривних пристроїв [10]. Новітні дослідження в галузі матеріалознавства демонструють значний прогрес: ламінована система на основі В4С-кераміки, арамідного підкладу і задньої пластини із AA2024-CNT (алюмінієво-матричний композит із вуглецевими нанотрубками) забезпечує захист рівня 4+ STANAG 4569 при питомій поверхневій щільності менше 100 кг/м² [5]; системи на основі Twaron і Endurmax верифіковані для умов багаторазового влучання на рівні 1 [6].

Однак принципова вада цього масиву для кранових застосувань полягає у тому, що всі роботи проектують захист для бойових броньованих машин (ББМ), де додаткова маса броні не впливає безпосередньо на функціональну ефективність. Для крана кожен кілограм захисної конструкції прямо вираховується з вантажного моменту – тобто є конкурентним конструктивним параметром, а не лише операційним обмеженням. Формальна задача Парето-оптимізації «рівень захисту STANAG – вантажний момент крана» у наявній науковій літературі не формулювалась і не вирішувалась.

Цифрові системи управління і автономне керування (Кластер 3)

Теорія управління кранами з придушенням коливань вантажу (anti-sway control) є зрілим субкластером із виразним прогресом у поточному десятилітті: від класичних PID- і LQR-регуляторів до MPC на базі MuJoCo-фізичного симулятора у реальному часі [7]. Адаптивне предикативне управління із data-driven моделюванням

запропоновано як альтернативу фізичним моделям для мостових кранів [8]; нейромережеві оцінювачі для компенсації гідродинамічних сил підводних кранів верифіковані через аналіз Ляпунова [9]. Системи LICCON (Liebherr Computed Control) і SPACEevo інтегрують захист від перевантаження і пропорційне гідравлічне управління у єдиний обчислювальний комплекс.

Методологічна прогалина кластера: жодна з публікацій не розглядає проблему GPS-незалежного абсолютного позиціонування гака мобільного крана в умовах РЕБ (радіоелектронної боротьби). Армія США розробляє автономні понтонні катери, де GPS-автономія є ключовою технологією [11], але координаційна задача «кран на березі + автономні катери на воді» як єдиний розподілений агентний комплекс не формалізована. Критична дилема між складністю алгоритму (RL, MPC) і надійністю в умовах DDIL-середовища не вирішена.

Операційна уразливість і ефективність у БПЛА-насиченому просторі (Кластер 4)

Конфлікт в Україні є безпрецедентним операційним середовищем для вивчення загроз від ударних БПЛА. За даними аналітиків, дрони відповідальні за більшість підтверджених втрат бронетехніки [1]. Аналітика підтверджує, що FPV-дрони є найпоширенішим засобом ураження, а зони безпосереднього контакту з противником трансформувались у «зони смерті», де навіть важкоброньована техніка функціонує лише при мінімальному відкритому перебуванні [12]. Роботизовані платформи ЗСУ за оцінками знизили втрати особового складу до 30 % на ключових ділянках [13].

Принципова академічна прогалина: кількісна модель ймовірності ураження неброньованого крана як функції від конфігурації захисту, тривалості операції, відстані до лінії зіткнення і насиченості ударними БПЛА у науковій літературі відсутня. Система обліку втрат техніки (Orux, Warspotting) фіксує втрати бронетехніки із значно вищою повнотою, ніж інженерну техніку – і це само по собі є методологічною проблемою для кількісних досліджень.

НАУКОВІ ПРОТИРІЧЧЯ ЯК ОСНОВА ДЛЯ ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

Аналіз чотирьох кластерів дозволяє виявити п'ять взаємопов'язаних наукових протиріч (табл. 1).

НАУКОВА ПРОБЛЕМА І МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

На підставі виявлених протиріч наукова проблема дослідження формулюється таким чином: відсутність системної науково-методологічної основи, що описує мобільний кран на автомобільному шасі як бойову технічну систему з кількісно визначеним профілем конкуруючих параметрів виживання, захисту, конструктивної надійності і управління, адаптованих до умов БПЛА-насиченого простору протиборства, унеможливило обґрунтований вибір проектних рішень і операційних обмежень, що відповідають реальному рівню загроз на сучасному полі бою.

Мета дослідження: розробити науково-методологічні основи системного аналізу та проектування мобільних кранів на автомобільному шасі як бойових технічних систем шляхом формалізації ієрархії конкуруючих па-

Таблиця 1. Наукові протиріччя дослідження

№	Існуюче знання (теза)	Реальна потреба (антитеза)
П1	Методи МСЕ-оптимізації стрілових систем верифіковані для квазістатичних підйомних режимів за ISO 4301	Польовий режим поєднує підйомне, ударне і вібраційне навантаження, для якого цивільна оптимальна конструкція може мати критично знижений ресурс
П2	Балістичне матеріалознавство розробляє легкі захисні системи STANAG 4569 для ББМ, де маса не конкурує з функціональністю	Маса бронювання кабіни крана прямо і кількісно знижує вантажний момент — функціональний параметр підйомної машини; цей компроміс ніде формально не описаний
П3	Теорія управління кранами з anti-sway забезпечує точне позиціонування вантажу за наявності GPS і стабільного комунікаційного каналу	DDIL-середовище бойового простору руйнує GPS-залежну навігацію і при затримці >150 мс порушує стійкість замкнутого контуру управління
П4	Кран традиційно класифікується як засіб тилового інженерного забезпечення з нормативними режимами роботи в захищених умовах	Фактичне застосування кранів у прифронтовій зоні з тривалою нерухомістю перетворює їх на пріоритетні статичні цілі для FPV-БПЛА
П5	Кожна профільна дисципліна має власний методологічний апарат для аналізу крана, але лише у межах своїх параметрів	Відсутній синтезуючий фреймворк, що одночасно враховує захист, конструктивну надійність, управління і операційний ризик як конкуруючі параметри єдиної системи

раметрів виживання оператора, балістичного захисту, конструктивної надійності під комбінованим навантаженням і живучості управління в умовах РЕБ-деградованого середовища та встановлення кількісних порогових умов, за яких виконання кранових операцій є операційно прийнятним з точки зору ризику ураження.

Об'єктом дослідження є мобільний автомобільний кран (репрезентативний зразок – серія КТА-25/КТА-32 на шасі КраЗ-63221) у прифронтовій зоні як технічна система, що одночасно виконує інженерні підйомно-монтажні завдання і функціонує під загрозою ураження засобами ближнього повітряного нападу.

Предметом дослідження є система конкуруючих параметрів «маса ретрофітного бронювання – вантажний момент – рівень балістичного захисту оператора», «режим навантаження – ресурс конструкції – вид і величина збурення», «точність позиціонування – стійкість контуру управління – рівень РЕБ-деградації» і «ймовірність ураження крана – тривалість операції – відстань до лінії зіткнення».

СТРУКТУРА ЧОТИРЬОХМОДУЛЬНОЇ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ ПРОГРАМИ

Запропонована дослідницька програма складається з чотирьох взаємопов'язаних модулів, зв'язаних ланцюгом передачі результатів: вихідні параметри попереднього модуля є вхідними обмеженнями для наступного.

Модуль 1 (M1): Операційна уразливість і порогові умови виживання

M1 є стратегічно вхідним модулем, що визначає умови задачі для решти програми. Центральним завданням є розробка аналітичної моделі умовної ймовірності P(kill | detection) для неброньованого крана від FPV-БПЛА з кумулятивним або осколковим зарядом. Модель будується на аналізі уразливості критичних вузлів: гідравлічної системи, кабіни оператора і блоку керування. Агентно-орієнтована симуляція «кран + БПЛА-середовище» параметризується за рівнем насиченості дронами, дальністю виявлення, тривалістю операції і наявністю засобів прикриття РЕБ. Аналіз «вартість–ефективність» (Cost-Effectiveness Analysis – CEА) порівнює ймовірнісні витрати від ураження з вартістю ретрофітного бронювання. Методи: дерево відмов (FTA), метод Монте-Кар-

ло, агентно-орієнтоване моделювання (АВМ). Цільовий журнал: Military Operations Research.

Модуль 2 (M2): Ретрофітне бронювання кабіни – матеріальний і масовий компроміс

M2 отримує від M1 цільові показники рівня захисту і масових обмежень. Завдання: побудувати Парето-фронт «рівень захисту STANAG 4569 – вантажний момент крана» для серії КТА, визначити оптимальні матеріальні рішення (В4С-кераміка + арамідний підклад + Hardox 440 або ARMOX 440T + UHMWPE залежно від температурних умов) і верифікувати вібраційну надійність клейових з'єднань кераміки при польових циклах. Методи: аналітична модель «поверхнева щільність – вантажний момент», Cohesive Zone Model (CZM) для аналізу розшарування, порівняльний балістичний аналіз конфігурацій. Цільовий журнал: Defence Technology (Elsevier, Q1).

Модуль 3 (M3): Структурна надійність стрілового комплексу під комбінованим навантаженням

M3 отримує від M1 характеристики прифронтових ударних збурень і від M2 уточнені масові параметри конструкції. Завдання: верифікувати граничні стани несучих конструкцій КТА-32 (сталь DOMEX S700–S960) при комбінованому навантаженні «квазістатичний підйом + стохастичне дорожнє збурення + ударна хвиля від близького підриву» і встановити умови збереження ресурсу. Методи: ANSYS LS-Dyna або Abaqus Explicit (нелінійна динаміка), LEFM (лінійна пружна механіка руйнування) для оцінки ресурсу при Low-Temperature Toughness (LTT), термічний аналіз матеріалів S700/S960 при діапазоні –40 °С...+50 °С. Цільовий журнал: Engineering Structures (Elsevier, Q1) або International Journal of Impact Engineering (Elsevier, Q1).

Модуль 4 (M4): GPS-незалежне дистанційне управління в умовах DDIL-середовища

M4 є найбільш технологічно перспективним і найвіддаленішим від негайного впровадження. Завдання: розробити архітектуру GPS-незалежного позиціонування гака (злиття IMU + UWB + стереоскопічний зір через Extended Kalman Filter), встановити порогові параметри комунікаційної затримки для збереження стійкості системи (аналіз Паде для системи з чистою часовою затримкою), верифікувати через Hardware-in-the-Loop

M1: Уразливість (FTA + ABM + SEA)	M2: Бронювання (Парето + CZM)	M3: Надійність стріли (LS-Дупа + LEFM)	M4: Управління (ЕКФ + НІЛ + Паде)
Порогові умови операційного ризику → вхід для M2, M3, M4	Оптимальна конфігурація броні і масові обмеження → вхід для M3, M4	Умови безпечної роботи стріли при польових збуреннях	Архітектура управління стійка до РЕБ і комунікаційних затримок
СИНТЕЗУЮЧИЙ ФРЕЙМВОРК: «Мобільний кран як бойова технічна система» — ієрархічна оптимізація конкуруючих параметрів			

Р и с . 1. Структура дослідницької програми і внутрішні зв'язки між модулями

(НІЛ) симуляцію. Методи: ЕКФ (Extended Kalman Filter – розширений фільтр Калмана) для сенсорного злиття, частотний аналіз стійкості, MATLAB Simulink / Simscape Multibody. Цільовий журнал: Automation in Construction (Elsevier, Q1) або Journal of Field Robotics (Wiley, Q1).

НАУКОВА НОВИЗНА І ПРАКТИЧНА ЗНАЧУЩІСТЬ

Наукова новизна очікуваних результатів дослідження може бути визначена такими позиціями:

- вперше буде розроблено аналітичну модель умовної ймовірності ураження мобільного крана від FPV-БПЛА як функції від кінематичних і конструктивних параметрів системи, придатну для кількісного оцінювання операційного ризику кранових операцій у прифронтовій зоні;
- вперше буде побудовано Парето-фронт «рівень захисту STANAG 4569 – вантажний момент крана», що фіксує кількісну залежність між основною функціональною характеристикою підйомної машини і її захисними властивостями;
- набуде подальшого розвитку методологія структурно-динамічного аналізу телескопічних стрілових систем через введення у модель навантаження класу «прифронтового» збурення, що враховує комбінацію підйомного, ударного і вибухового впливів;
- набудуть подальшого розвитку наукові дослідження в галузі GPS-незалежного позиціонування рухомих вантажів через обґрунтування архітектури сенсорного злиття і встановлення порогових параметрів затримки для збереження стійкості управління;
- вперше буде сформовано системний фреймворк опису мобільного крана як бойової технічної системи з ієрархічно організованою множиною конкуруючих цільових функцій.

Практична значущість результатів охоплює три рівні: (1) рівень проектування – технічні вимоги до ретрофітного бронювання кабін КТА-серії як основа для ДКР (дослідно-конструкторських робіт); (2) рівень оперативного планування – кількісні порогові умови безпечної виконання кранових операцій поблизу лінії зіткнення, придатні для інтеграції до бойових статутів і методичних настанов; (3) рівень стандартизації НАТО – системний фреймворк як внесок у розвиток стандартів STAN AG, що регламентують застосування інженерної техніки в умовах загрози БПЛА, використовуваних країнами-партнерами.

ОБМЕЖЕННЯ І ВІДКРИТІ ПИТАННЯ

Дослідницька програма несе три явні обмеження, що необхідно зафіксувати для збереження методологічної чесності.

По-перше, верифікаційне обмеження: найбільш критичні параметри моделей (реальна P(kill) крана від FPV, дані про втрати операторів конкретних класів техніки) є або частково закритими, або доступними лише через OSINT-реконструкцію з відомою неповнотою. Це вимагає сценарного аналізу чутливості у кожному модулі.

По-друге, обмеження узагальнюваності: КТА-серія на шасі КрАЗ є специфічним зразком техніки ЗСУ, і результати окремих модулів безпосередньо застосовні до цього класу. Перенесення висновків на All-Terrain крани Liebherr G-LTM або Grove GMK4060HC потребує окремої параметризації, хоча методологічний фреймворк є класово-незалежним.

По-третє, темп старіння: БПЛА-загрози еволюціонують швидше, ніж академічний цикл публікацій. Результати M1 і M4 мають бути зпроектовані як оновлювані бази параметрів, а не одноразові знімки технологічного стану.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз виявив системний розрив між академічними досягненнями у чотирьох профільних дисциплінах і відсутністю синтезуючого підходу до опису мобільного крана як бойової системи. П'ять сформульованих наукових протиріч не є ізольованими: вони утворюють ієрархічну структуру, де операційний ризик ураження є вершиною ієрархії, а структурна надійність стріли – її основою. Запропонована чотирьохмодульна дослідницька програма є першою формалізованою спробою інтегрувати ці рівні в єдину систему з кількісно визначеними конкуруючими параметрами.

Ключовою методологічною тезою статті є теза про те, що між поняттями «підйомна машина» і «бойова система» є не просто контекстуальна відмінність, а принципова системна різниця у наборі цільових функцій, обмежень і режимів навантаження. Академічне поле, яке не має інструментарію для опису цієї різниці, неминуче продукуватиме рішення, оптимальні для мирного часу і субоптимальні або небезпечні для умов бойових дій. Запропонована дослідницька програма є кроком до усунення цього розриву.

Пріоритетним для практичного впровадження є перший модуль – встановлення кількісних порогових умов безпечної виконання кранових операцій, – оскільки він надає операційним командирам формально обґрунтований інструмент для ухвалення рішень щодо розгортання техніки, що нині спирається виключно на тактичне чуття і неформальний досвід.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Drone warfare in Ukraine: FPV drones account for over 65 % of armored vehicle losses. Defence Ukraine. 2025. URL: <https://www.defenceukraine.com/en/insights/fpv-drones-ukraine-war-analysis/>
2. Structural optimization of the telescopic boom of a certain type of truck-mounted crane. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 548—549. Pp. 383—388. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.548-549.383>.
3. Reliability-based design optimization for the lattice boom of crawler crane [team of authors]. *Structures*. 2020. Vol. 28. Pp. 2315—2327. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.061>.
4. Multi-Objective Reliability Optimization of Telescopic Boom for Special Vehicles Based on RSM-RBFNN Hybrid Surrogate Model. *Processes*. 2025. Vol. 13. No. 12. Art. 3811. <https://doi.org/10.3390/pr13123811>.
5. Advanced Composite Armor Protection Systems for Military Vehicles: Design Methodology, Ballistic Testing, and Comparison. *Composites Science and Technology*. 2024. Vol. 251. Art. 110486. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110486>.
6. Comprehensive Evaluation of Layered Composite Protection Performance for Light Armored Vehicles. *J. of Materials Engineering and Performance*. 2025. Vol. 34. Pp. 28643—28660. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11553-3>.
7. Onboard MuJoCo-based Model Predictive Control for Shipboard Crane with Double-Pendulum Sway Suppression. *arXiv*. 2025. arXiv: 2603.16407.
8. Data-driven Modeling and Adaptive Predictive Anti-swing Control of Overhead Cranes. *International J. of Control, Automation, and Systems*. 2022. Vol. 20. <https://doi.org/10.1007/s12555-022-0025-8>.
9. Neural Network-based Robust Anti-sway Control of an Industrial Crane Subjected to Hoisting Dynamics. *Intern. J. of Control, Automation, and Systems*. 2021. Vol. 19. No. 5. Pp. 1953—1961. <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0333-9>.
10. STANAG 4569 AEP-55 Ed. 4. Protection Levels For Occupants Of Armoured Vehicles. NATO Standardization Office. 2022.
11. Autonomous Robotic Bridging / US Army SBIR Program. 2025.
12. Beyond the Gauntlet: Drone Dominance and the Lessons of Ukraine's FPV War. *Inside Unmanned Systems*. 2025. URL: <https://insideunmannedsystems.com>.
13. Networked for War: Lessons from Ukraine's Ground Robots. *Modern War Institute at West Point*. 2025. URL: <https://mwi.westpoint.edu>.
14. Liebherr armoured military cranes G-LTM 1090-4.2 and G-BKF. Liebherr-Werk Ehingen GmbH. 2024. URL: <https://www.liebherr.com/en-us/mobile-and-crawler-cranes/mobile-cranes/military-cranes-4407393>.
15. Технічні характеристики КТА-25 / ДАК. Дрогобицький завод автомобільних кранів. 2024. URL: <https://dak.com.ua>.
16. Estimation of Damage Probability of Combat Vehicle Components Based on Modeling and Simulation. *J. of Mechanical Science and Technology*. 2020. Vol. 34. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1224-y>.
17. Reliability-Based Topology Optimization of Large-Tonnage Crane Boom Head With Stress Constraint. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. P. C.* 2024. <https://doi.org/10.1177/09544062241228983>.
18. Grove GMK4060HC All-Terrain Crane for U.S. Army. *Heavy Equipment Guide*. 2020. <https://www.heavyequipmentguide.ca/article/34061>.
19. US Army Experiments With Autonomous Boat for River Crossing (MSPIX 25). *Janes*. 2025. URL: <https://www.janes.com>.
20. Optimization Design of Curved Outrigger Structure Based on Buckling Analysis and Multi-Island Genetic Algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13. <https://doi.org/10.1177/00368504211023277>.

REFERENCES

1. Drone warfare in Ukraine: FPV drones account for over 65 % of armored vehicle losses. Defence Ukraine. 2025. URL: <https://www.defenceukraine.com/en/insights/fpv-drones-ukraine-war-analysis/>
2. Structural optimization of the telescopic boom of a certain type of truck-mounted crane. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 548—549. Pp. 383—388. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.548-549.383>.
3. Reliability-based design optimization for the lattice boom of crawler crane [team of authors]. *Structures*. 2020. Vol. 28. Pp. 2315—2327. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.061>.
4. Multi-Objective Reliability Optimization of Telescopic Boom for Special Vehicles Based on RSM-RBFNN Hybrid Surrogate Model. *Processes*. 2025. Vol. 13. No. 12. Art. 3811. <https://doi.org/10.3390/pr13123811>.
5. Advanced Composite Armor Protection Systems for Military Vehicles: Design Methodology, Ballistic Testing, and Comparison. *Composites Science and Technology*. 2024. Vol. 251. Art. 110486. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110486>.
6. Comprehensive Evaluation of Layered Composite Protection Performance for Light Armored Vehicles. *J. of Materials Engineering and Performance*. 2025. Vol. 34. Pp. 28643—28660. <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11553-3>.
7. Onboard MuJoCo-based Model Predictive Control for Shipboard Crane with Double-Pendulum Sway Suppression. *arXiv*. 2025. arXiv: 2603.16407.
8. Data-driven Modeling and Adaptive Predictive Anti-swing Control of Overhead Cranes. *International J. of Control, Automation, and Systems*. 2022. Vol. 20. <https://doi.org/10.1007/s12555-022-0025-8>.
9. Neural Network-based Robust Anti-sway Control of an Industrial Crane Subjected to Hoisting Dynamics. *Intern. J. of Control, Automation, and Systems*. 2021. Vol. 19. No. 5. Pp. 1953—1961. <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0333-9>.
10. STANAG 4569 AEP-55 Ed. 4. Protection Levels For Occupants Of Armoured Vehicles. NATO Standardization Office. 2022.
11. Autonomous Robotic Bridging / US Army SBIR Program. 2025.
12. Beyond the Gauntlet: Drone Dominance and the Lessons of Ukraine's FPV War. *Inside Unmanned Systems*. 2025. URL: <https://insideunmannedsystems.com>.
13. Networked for War: Lessons from Ukraine's Ground Robots. *Modern War Institute at West Point*. 2025. URL: <https://mwi.westpoint.edu>.

14. Liebherr armoured military cranes G-LTM 1090-4.2 and G-BKF. Liebherr-Werk Ehingen GmbH. 2024. URL: <https://www.liebherr.com/en-us/mobile-and-crawler-cranes/mobile-cranes/military-cranes-4407393>.
15. “Tekhnichni kharakterystyky KTA-25 / DAK. Drohobyskyi zavod avtomobilnykh kraniv” [Technical characteristics KTA-25 / DAK. Drohobych Truck Crane Plant]. 2024. URL: <https://dak.com.ua>.
16. Estimation of Damage Probability of Combat Vehicle Components Based on Modeling and Simulation. J. of Mechanical Science and Technology. 2020. Vol. 34. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1224-y>.
17. Reliability-Based Topology Optimization of Large-Tonnage Crane Boom Head With Stress Constraint. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. P. C. 2024. <https://doi.org/10.1177/09544062241228983>.
18. Grove GMK4060HC All-Terrain Crane for U.S. Army. Heavy Equipment Guide. 2020. <https://www.heavyequipmentguide.ca/article/34061>.
19. US Army Experiments With Autonomous Boat for River Crossing (MSPIX 25). Janes. 2025. URL: <https://www.janes.com>.
20. Optimization Design of Curved Outrigger Structure Based on Buckling Analysis and Multi-Island Genetic Algorithm. Advances in Mechanical Engineering. 2021. Vol. 13. <https://doi.org/10.1177/00368504211023277>.

Zalisko I.I., Himber S.M.

**SYSTEM ANALYSIS AND OPTIMIZATION
METHODOLOGY FOR MOBILE CRANES
ON TRUCK CHASSIS IN ACTIVE COMBAT
CONDITIONS: STRUCTURAL RELIABILITY,
BALLISTIC PROTECTION AND SURVIVABILITY**

This article demonstrates the relevance and scientific and practical significance of a new research direction: the systematic analysis of mobile cranes mounted on truck chassis as combat technical systems in a UAV-saturated combat environment. Based on an analysis of four thematic clusters of the reviewed literature, a systemic gap has been identified between academic achievements in the fields of structural mechanics, ballistic materials science, control theory, and military analytics, and the lack of a synthesizing interdisciplinary approach to describing the crane as a unified combat system. Five key scientific contradictions were identified, forming the research problem of the study. Based on the experience of the armed conflict in Ukraine in 2022–2026, the transformation of threats to unarmored engineering vehicles posed by FPV-UAVs is characterized,

and the fundamental insolubility of this problem within the framework of any single discipline is demonstrated. A four-module research program structure is proposed, defining scientific tasks, methods, and target journals for publications. The article substantiates the relevance and issues of the new research direction.

Keywords: mobile crane, combat vehicle system, ballistic protection, STANAG 4569, FPV UAV, structural reliability, telescopic boom, remote control, survivability, engineering equipment.

Відомості про авторів:

Заліско Ігор Ігорович

кандидат технічних наук
генеральний директор
Дрогобицький завод автомобільних кранів
м. Дрогобич, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8353-9524>
e-mail: dak@dak.com.ua

Гімбер Сергій Миколайович

інженер, начальник науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки Сил підтримки
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7616-3944>
e-mail: serhumber@ukr.net

Information about the authors:

Zalisko Ihor

Candidate of Technical Sciences
CEO of the Drohobych Truck Crane Plant
Drohobych, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8353-9524>
e-mail: dak@dak.com.ua

Himber Serhii

Engineer
Head of the Research and Development Department for Scientific Research of Armament and Military Equipment of the Support Forces
Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7616-3944>
e-mail: serhumber@ukr.net

Стаття надійшла до редколегії 14.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.