

Метод воєнно-економічного оцінювання розвідувальних безпілотних авіаційних систем для вибору раціонального зразка

Method for Military-Economic Assessment of Reconnaissance Unmanned Aerial Systems for Selecting a Rational Alternative

Володимир Коваль^A

Corresponding author кандидат військових наук, старший науковий співробітник, e-mail: vladimerkoval69@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6209-6779>

Юзеф Добровольський^B

кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри, e-mail: kataza@i.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1077-1402>

Артем Ремез^F

доктор філософії, професор кафедри оперативного мистецтва, e-mail: remez.art.86@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4970-1097>

Роман Дзюбчук^D

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри, e-mail: rd_zt@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6224-456X>

Василь Загородній^C

кандидат медичних наук, завідувач кафедри, e-mail: zagorodniyv@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7954-4435>

Сергій Ротте^C

кандидат технічних наук, доцент кафедри, e-mail: red3spirit@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1281-1241>

Volodymyr Koval^A

Corresponding author: Candidate of Military Sciences, Senior Researcher, e-mail: vladimerkoval69@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6209-6779>

Yuzef Dobrovolskyi^B

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: kataza@i.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1077-1402>

Artem Remez^F

Doctor of Philosophy, Professor of the Department of Operatic Art, e-mail: remez.art.86@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4970-1097>

Roman Dziubchuk^D

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department, e-mail: rd_zt@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6224-456X>

Vasyl Zagorodniy^C

Candidate of Medical Sciences, Head of the Department, e-mail: zagorodniyv@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7954-4435>

Serhii Rotte^C

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: red3spirit@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1281-1241>

^A Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ, Україна

^B Кафедра військової підготовки Державного університету "Київський авіаційний університет", м. Київ, Україна

^C Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

^D Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, Житомир, Україна

^F Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

^A Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

^B Department of Military Training, State University "Kyiv Aviation University", Kyiv, Ukraine

^C Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

^D Zhytomyr Military Institute named after S.P. Korolev, Zhytomyr, Ukraine

^F National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: August 9, 2026 | Revised: August 29, 2026 | Accepted: August 31, 2026

УДК 623.746.2:355.40:338.5.

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.25>

Мета роботи. Розробити метод воєнно-економічного оцінювання розвідувальних безпілотних авіаційних систем (БПАС), який забезпечує обґрунтований вибір раціональної альтернативи за критерієм "ефективність-вартість" з урахуванням умов радіоелектронної протидії, багаторазовості застосування та вартості життєвого циклу.

Метод дослідження. Системний підхід; багатокритеріальне оцінювання з адитивною згортою нормованих показників; метод аналізу ієрархії для визначення вагових коефіцієнтів; групове експертне оцінювання із залученням 12 експертів; методологія вартості життєвого циклу; сценарне коригування показника бойової ефективності відповідно до умов застосування; обчислювальний експеримент та аналіз чутливості.

Результати. Розроблено чотириблоковий метод воєнно-економічного оцінювання розвідувальних БПАС, що охоплює формування вихідних даних, підготовчі розрахунки, визначення інтегрального показника бойової ефективності та прийняття рішення. Запропоновано систему з дев'яти часткових показників, об'єднаних у три групи: розвідувальні

Purpose. To develop a method for the military-economic assessment of reconnaissance unmanned aerial systems (UASs) that enables the substantiated selection of a rational alternative based on the "cost-effectiveness" criterion while accounting for electronic warfare conditions, reusability, and life-cycle cost.

Method. A systems approach; multi-criteria assessment using additive aggregation of normalised indicators; the Analytic Hierarchy Process for determining weighting coefficients; group expert assessment involving 12 experts; life-cycle cost methodology; scenario-based adjustment of the combat-effectiveness indicator to operating conditions; computational experiment and sensitivity analysis.

Findings. A four-block method for the military-economic assessment of reconnaissance UASs was developed, comprising input-data formation, preparatory calculations, determination of an integrated combat-effectiveness indicator, and decision-making. A system of nine partial indicators grouped into reconnaissance capabilities, survivability, and operational

можливості, живучість та експлуатаційні властивості. Варові коефіцієнти визначено методом аналізу ієрархій за результатами групового експертного оцінювання. Обґрунтовано застосування порогового відсіву альтернатив за мінімально допустимим рівнем приведеної бойової ефективності та подальше ранжування допустимих альтернатив за критерієм “ефективність–вартість”. За результатами обчислювального експерименту на дванадцять умовних зразках раціональною альтернативою визначено БпАС-08 ($K = 0,0626$); її перше місце зберігається в усіх п’яти досліджених сценаріях аналізу чутливості.

Науково-методичне значення дослідження. Удосконалено методичний підхід до воєнно-економічного оцінювання розвідувальних безпілотних авіаційних систем шляхом інтегрованого врахування багатокритеріальної оцінки бойової ефективності, вартості життєвого циклу, багаторазовості застосування, радіоелектронної протидії та порогових умов допустимості альтернатив. Запропонований підхід може бути використаний для аналізу альтернатив у процесах оборонного планування, розвитку озброєння та обґрунтування оборонних закупівель.

Тип статті: методична, розрахунково-аналітична.

Ключові слова: розвідувальна безпілотна авіаційна система; воєнно-економічне оцінювання; бойова ефективність; вартість життєвого циклу; критерій “ефективність–вартість”; радіоелектронна боротьба; багатокритеріальне оцінювання; оборонні закупівлі.

properties was proposed. Weighting coefficients were determined using the Analytic Hierarchy Process based on group expert assessment. Threshold screening of alternatives by the minimum acceptable level of adjusted combat effectiveness was introduced, followed by ranking of admissible alternatives according to the “cost-effectiveness” criterion. In the computational experiment involving twelve conditional alternatives, UAS-08 was identified as the rational alternative ($K = 0.0626$); it retained first rank across all five sensitivity-analysis scenarios examined.

Methodological implications. The study improves the methodological framework for the military-economic assessment of reconnaissance unmanned aerial systems by integrating multi-criteria combat-effectiveness assessment, life-cycle cost, reusability, electronic warfare conditions, and threshold admissibility constraints within a single decision-support procedure. The proposed approach can support analysis of alternatives in defence planning, armament development, and defence procurement.

Article type: methodical, computational and analytical.

Key words: Reconnaissance Unmanned Aerial System; Military-Economic Assessment; Combat Effectiveness; Life Cycle Cost; “Cost-Effectiveness” Criterion; Electronic Warfare; Multi-Criteria Assessment; Defence Procurement.

Вступ

Актуальність дослідження зумовлена перетворенням розвідувальних безпілотних авіаційних систем (БпАС) із допоміжного засобу повітряного спостереження на системоутворювальний елемент розвідувально-ударних і розвідувально-вогневих контурів. Досвід збройного конфлікту в Нагірному Карабасі 2020 року та повномасштабної збройної агресії російської федерації проти України засвідчив істотне зростання ролі безпілотних систем у веденні розвідки, спостереженні, цілевказанні та забезпеченні вогневого ураження на тактичному й оперативному-тактичному рівнях [1; 2; 3].

Темпи надходження нових зразків до військ і оновлення їх номенклатури суттєво перевищують аналогічні показники для традиційних видів озброєння та військової техніки. Одночасно на озброєнні та в дослідній експлуатації перебувають десятки зразків вітчизняного та іноземного виробництва, що суттєво відрізняються за глибиною ведення розвідки, тривалістю польоту, складом цільового навантаження, стійкістю до радіоелектронної протидії, вартістю закупівлі та вартістю подальшої експлуатації.

Під час обґрунтування вибору зразків розвідувальних БпАС використання лише окремих технічних або вартісних характеристик не забезпечує комплексного врахування бойової ефективності, живучості, надійності, багаторазовості та тривалості застосування зразка [4; 5]. Застосування формалізованих багатокритеріальних процедур дає змогу підвищити прозорість і обґрунтованість порівняння альтернатив.

Мета роботи: розробити метод воєнно-економічного оцінювання розвідувальних безпілотних авіаційних систем (БпАС), який забезпечує обґрунтований вибір раціональної альтернативи за критерієм “ефективність–вартість” з урахуванням умов радіоелектронної протидії, багаторазовості застосування та вартості життєвого циклу.

Для досягнення поставленої мети в дослідженні вирішуються такі основні завдання: обґрунтувати систему часткових показників і критеріїв комплексного оцінювання розвідувальних БпАС; розробити структурно-логічну схему методу та математичне забезпечення його етапів; провести обчислювальний експеримент із табличним і графічним поданням результатів розрахунків; сформулювати рекомендації щодо порядку та місця застосування методу на рівні Збройних Сил України та Міністерства оборони України.

Огляд літератури

Сучасні підходи до воєнно-економічного обґрунтування розвитку озброєння та військової техніки ґрунтуються на необхідності одночасного врахування оперативної-технічної результативності зразка та ресурсів, необхідних для його створення, придбання, експлуатації й підтримання упродовж установленого строку служби. У цьому контексті одним із базових інструментів оцінювання виступає критерій “ефективність–вартість”, який дає змогу зіставляти альтернативні зразки не лише за рівнем їхніх характеристик, а й за витратами, необхідними для досягнення відповідного результату. Важливим доповненням до такого підходу є концепція вартості життєвого циклу (Life Cycle Cost, LCC), що передбачає врахування сукупних витрат на придбання, експлуатацію, технічне обслуговування, підготовку персоналу та інші складові протягом життєвого циклу виробу [13; 14; 15; 16; 17].

Зазначений підхід узгоджується з принципами оборонного планування на основі спроможностей, відповідно до яких рішення щодо розвитку озброєння мають прийматися у взаємозв’язку між завданнями, необхідними спроможностями, ресурсними обмеженнями та очікуваним рівнем готовності. У межах такого планування вибір конкретного зразка озброєння розглядається як складова ширшого процесу формування необхідної спроможності, а економічні параметри мають оцінюватися разом з оперативними та технічними характеристиками [5; 24].

Значний напрям сучасних досліджень становлять методи багатокритеріального оцінювання альтернатив. Для задач вибору озброєння та військової техніки застосовують метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, AHP), адитивні та мультиплікативні моделі згортання показників, методи TOPSIS, PROMETHEE, нечіткі моделі та процедури групового експертного оцінювання [9; 10; 11]. Їхньою перевагою є можливість формалізувати вибір за умов, коли альтернативи одночасно характеризуються значною кількістю кількісних і якісних параметрів, а їхня відносна важливість істотно відрізняється.

Окремий напрям становлять дослідження, присвячені багатокритеріальному вибору зразків озброєння та обґрунтуванню рішень щодо розвитку військових спроможностей за умов ресурсних обмежень [5; 9; 12]. У таких роботах задача вибору виходить за межі простого порівняння тактико-технічних характеристик і розглядається як зіставлення необхідної ефективності, характеристик альтернатив та ресурсних обмежень.

Щодо безпілотних авіаційних систем наявні дослідження переважно зосереджуються на виборі платформи за сукупністю критеріїв, оцінюванні тактико-технічних характеристик, надійності та експлуатаційної стійкості [10; 11; 12; 18; 19; 20]. У таких моделях, як правило, враховуються дальність і тривалість польоту, характеристики цільового навантаження, надійність, вартість придбання та окремі експлуатаційні витрати.

Водночас для розвідувальних безпілотних авіаційних систем істотного значення набувають характеристики, які недостатньо враховуються в традиційних моделях порівняння. До них належать багаторазовість застосування, призначений ресурс, тривалість експлуатації, стійкість до радіоелектронної протидії, можливість збереження ефективності в умовах впливу противника, а також сукупні витрати протягом періоду використання системи. У наявних дослідженнях ці аспекти висвітлюються переважно окремими напрямками: через проблематику надійності й технічного обслуговування, вартості життєвого циклу та протидії засобам РЕБ [13; 14; 16; 18; 19; 21; 23].

Таким чином, аналіз наукових праць свідчить про наявність методичного розриву між багатокритеріальним оцінюванням технічних характеристик БпАС та їх воєнно-економічним оцінюванням з урахуванням вартості життєвого циклу і фактичних умов бойового застосування. Це зумовлює необхідність розроблення методу, який поєднає оцінювання розвідувальних можливостей, живучості та експлуатаційних властивостей із вартісними

характеристиками і дає змогу здійснювати вибір раціональної альтернативи за критерієм “ефективність–вартість”.

Методологія дослідження

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні системного підходу, багатокритеріального оцінювання, методу аналізу ієрархій, групового експертного оцінювання, нормування різнорідних показників та воєнно-економічного зіставлення альтернатив за критерієм “ефективність–вартість”.

Об’єктом оцінювання прийнято розвідувальну безпілотну авіаційну систему (БпАС) як сукупність одного або кількох безпілотних літальних апаратів, цільових навантажень, наземної станції управління, засобів зв’язку, старту, посадки, транспортування та технічного обслуговування. Такий підхід дає змогу оцінювати не лише характеристики окремого літального апарата, а функціонально завершену систему, що безпосередньо виступає об’єктом закупівлі, експлуатації та ресурсного забезпечення.

1. Формування системи критеріїв оцінювання

Для оцінювання розвідувальних БпАС сформовано ієрархічну систему критеріїв, що включає три групи показників:

- розвідувальні можливості;
- живучість в умовах протидії;
- експлуатаційні властивості.

До складу зазначених груп включено дев’ять часткових показників, які характеризують продуктивність виявлення об’єктів, імовірність їх ідентифікації, глибину ведення розвідки, тривалість польоту, захищеність від засобів РЕБ і засобів ураження, напрацювання на відмову, призначений ресурс застосувань та строк експлуатації.

Усі часткові показники мають стимулюючий характер, тобто належать до типу “чим більше, тим краще”.

Перелік показників, їх належність до відповідних груп та отримані вагові коефіцієнти наведено в табл. 1.

Таблиця 1: Система часткових показників воєнно-економічного оцінювання розвідувальних БпАС

Група показників (вага групи)	Поз.	Найменування часткового показника	Одиниця виміру	Вага в групі w_i
Розвідувальні можливості E_1 ($W_1 = 0,45$)	x_1	Продуктивність виявлення об’єктів	цілей/год	0,32
	x_2	Імовірність ідентифікації об’єкта	—	0,26
	x_3	Глибина ведення розвідки	км	0,24
	x_4	Тривалість польоту	год	0,18
Живучість E_2 ($W_2 = 0,30$)	x_5	Захищеність від засобів РЕБ	—	0,55
	x_6	Захищеність від засобів ураження	—	0,45
Експлуатаційні властивості E_3	x_7	Напрацювання на відмову	год	0,40

Група показників (вага групи)	Поз.	Найменування часткового показника	Одиниця виміру	Вага в групі w_i
$(W_3 = 0,25)$	x_8	Призначений ресурс застосувань	польотів	0,35
	x_9	Строк експлуатації		0,25

Джерело: розроблено авторами за результатами групового експертного оцінювання із застосуванням методу аналізу ієрархій (АНР); у дослідженні брали участь 12 експертів, індивідуальні матриці попарних порівнянь агреговано методом геометричного середнього.

2. Визначення вагових коефіцієнтів

Для визначення вагових коефіцієнтів групових та часткових показників застосовано метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, АНР) [6; 7]. Його використання дає змогу формалізувати експертні судження щодо відносної важливості критеріїв і забезпечити узгоджене агрегування показників різного змісту.

Ієрархія оцінювання сформована на трьох рівнях: на першому рівні визначено мету оцінювання – вибір раціональної БпАС; на другому рівні визначено три групи критеріїв; на третьому – дев'ять часткових показників.

Експертне оцінювання проведено із залученням 12 фахівців, компетентних у сферах застосування безпілотних авіаційних систем, військового управління, оборонного планування та експлуатації озброєння і військової техніки. Кожен експерт здійснював попарне порівняння критеріїв відповідного рівня ієрархії із використанням дев'ятибальної фундаментальної шкали Сааті.

Для формування групової матриці попарних порівнянь індивідуальні експертні оцінки агрегували методом геометричного середнього:

$$\bar{a}_{ij} = \left(\prod_{k=1}^q a_{ij}^{(k)} \right)^{1/q},$$

де $\bar{a}_{ij}$ – агрегована групова оцінка відносної важливості i -го критерію порівняно з j -м;

$a_{ij}^{(k)}$ – оцінка i -го критерію порівняно з j -м, надана k -м експертом;

q – кількість експертів, $q = 12$.

Після формування агрегованих матриць визначали локальні вагові коефіцієнти шляхом обчислення нормованого головного власного вектора відповідної матриці. Значення ваг нормували так, щоб їхня сума на кожному рівні ієрархії дорівнювала одиниці.

Узгодженість матриць попарних порівнянь оцінювали за індексом узгодженості CI та відношенням узгодженості CR:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad CR = \frac{CI}{RI},$$

де λ_{max} – максимальне власне значення матриці попарних порівнянь;

n – порядок матриці попарних порівнянь;

CI – індекс узгодженості;

RI – випадковий індекс узгодженості Сааті для матриці порядку n ;

CR – відношення узгодженості.

Значення $CR \leq 0,10$ вважалося прийнятним рівнем узгодженості матриці попарних порівнянь.

У разі перевищення зазначеного порогового значення експертні судження підлягали повторному уточненню.

Параметри організації групового експертного оцінювання наведено в табл. 2.

Таблиця 2: Параметри групового експертного оцінювання методом аналізу ієрархій

Рівень ієрархії	Кількість критеріїв	Кількість експертів	Метод агрегування	Граничне значення CR
Групові показники	3	12	Геометричне середнє	$CR \leq 0,10$
Розвідувальні можливості	4	12	Геометричне середнє	$CR \leq 0,10$
Живучість	2	12	Геометричне середнє	$CR \leq 0,10$
Експлуатаційні властивості	3	12	Геометричне середнє	$CR \leq 0,10$

3. Формалізація задачі вибору

Нехай задано множину альтернативних зразків розвідувальних БпАС:

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\},$$

кожен з яких характеризується сукупністю тактико-технічних, експлуатаційних і вартісних параметрів.

Для кожної альтернативи задано значення дев'яти часткових показників $x_1, \dots, x_9$, а також вартісні характеристики: закупівельну ціну C_3 , вартість льотної години C_r , витрати на підготовку розрахунку C_n та витрати на технічне обслуговування $C_{то}$.

Задача дослідження полягає у визначенні раціонального зразка

$$A^* \in A,$$

який забезпечує найкраще співвідношення між інтегральною ефективністю та витратами за умови виконання встановлених вимог до мінімально допустимого рівня ефективності.

Методична особливість задачі полягає в тому, що безпосередня максимізація питомого показника “ефективність–вартість” може призвести до переваги відносно дешевих систем малого класу, які мають високе відношення ефективності до вартості, але не забезпечують виконання розвідувального завдання за необхідною глибиною, тривалістю або в умовах заданого рівня протидії.

Тому процедура вибору передбачає два послідовні етапи:

перевірку відповідності альтернатив мінімально допустимому рівню ефективності; ранжування допустимих альтернатив за критерієм “ефективність–вартість”.

Такий підхід дає змогу уникнути вибору економічно привабливої, але функціонально непридатної БпАС.

4. Нормування часткових показників

Оскільки вихідні характеристики мають різну фізичну природу та одиниці вимірювання, перед агрегуванням їх приводять до безрозмірного вигляду.

У межах обчислювального експерименту використано лінійне *min–max* нормування:

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2)$$

де x_{ij} – фактичне значення j -го часткового показника i -ї альтернативи;

$x_j^{\min}$ – мінімальне значення j -го показника у фіксованій множині порівнюваних альтернатив;

де x_{ij} – фактичне значення j -го часткового показника i -ї альтернативи;
 x_j^{max} – максимальне значення j -го показника у фіксованій множині порівнюваних альтернатив;
 $\tilde{x}_{ij}$ – нормоване значення j -го показника i -ї БпАС.

За такого перетворення $0 \leq \tilde{x}_{ij} \leq 1$.

Оскільки всі часткові показники є стимуляторами, для них застосовується єдина пряма процедура нормування.

5. Формування групових та інтегрального показників

На основі нормованих значень часткових показників визначаються групові показники розвідувальних можливостей, живучості та експлуатаційних властивостей:

$$E_{1i} = \sum_{j=1}^4 w_j \tilde{x}_{ij}, \quad (3)$$

$$E_{2i} = \sum_{j=5}^6 w_j \tilde{x}_{ij}, \quad (4)$$

$$E_{3i} = \sum_{j=7}^9 w_j \tilde{x}_{ij}, \quad (5)$$

де E_{1i} – груповий показник розвідувальних можливостей i -ї БпАС;
 E_{2i} – груповий показник живучості i -ї БпАС;
 E_{3i} – груповий показник експлуатаційних властивостей i -ї БпАС;
 w_j – локальний ваговий коефіцієнт j -го часткового показника в межах відповідної групи;
 $\tilde{x}_{ij}$ – нормоване значення j -го часткового показника i -ї БпАС.

Інтегральний показник ефективності визначається як зважена згортка групових показників:

$$E_i = W_1 E_{1i} + W_2 E_{2i} + W_3 E_{3i}, \quad \sum_k W_k = 1. \quad (6)$$

де E_i – інтегральний показник ефективності i -ї БпАС;
 W_k – ваговий коефіцієнт k -ї групи показників;
 E_{ki} – значення k -го групового показника i -ї БпАС.

За прийнятої процедури нормування інтегральний показник набуває значень у діапазоні

$$0 \leq E_i \leq 1,0,$$

а його більше значення відповідає вищій сукупній оцінці характеристик БпАС.

Послідовність реалізації запропонованого методу охоплює формування вихідних даних і системи критеріїв, визначення вагових коефіцієнтів, нормування часткових показників, розрахунок групових та інтегрального показників ефективності, урахування умов застосування, пороговий відбір альтернатив, оцінювання вартості життєвого циклу та їх подальше ранжування за критерієм “ефективність–вартість”. Структурно-логічну схему реалізації методу наведено на рис. 1.

Наведена послідовність забезпечує поетапний перехід від оцінювання характеристик БпАС до формування множини допустимих альтернатив та визначення раціонального зразка за критерієм “ефективність–вартість”. Результати апробації запропонованого методу наведено в наступному розділі.

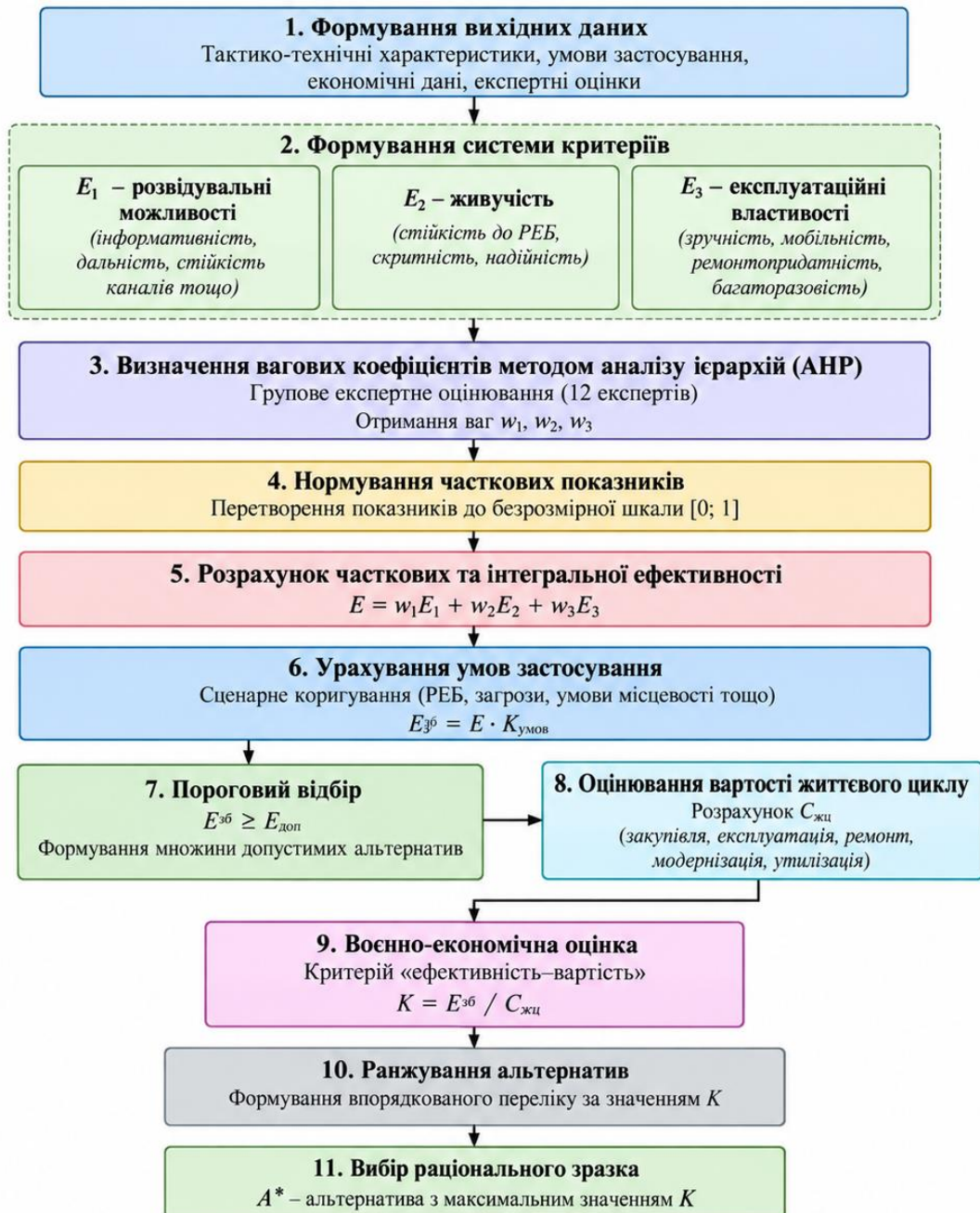


Рисунок 1: Структурно-логічна схема методу воєнно-економічного оцінювання розвідувальних БПАС

Джерело: розроблено авторами.

Результати дослідження

Для апробації запропонованого методу проведено обчислювальний експеримент на множині з 12 умовних зразків розвідувальних безпілотних авіаційних систем БПАС-01–БПАС-12. Вихідні характеристики узагальнюють типові системи різних класів – від малих квадрокоптерних платформ до середніх безпілотних систем літакового типу. Для кожної альтернативи задано дев'ять тактико-технічних та експлуатаційних показників, а також чотири вартісні характеристики.

У базовому сценарії прийнято помірний рівень радіоелектронної протидії з коефіцієнтом $K_0 = 0,70$, коефіцієнт метеорологічних умов $K_{\text{мет}} = 0,95$ та коефіцієнт впливу місцевості $K_{\text{місц}} = 0,97$. Мінімально допустиме значення приведенного показника ефективності встановлено на рівні $E_{\text{доп}} = 0,40$, а межу практичної нерозрізненості альтернатив – $\delta = 0,05$.

1. Результати нормування та визначення показників ефективності

На першому етапі вихідні показники було нормовано відповідно до формули (2). На основі отриманих значень за формулами (3)–(5) визначено групові показники розвідувальних можливостей E_1 , живучості E_2 та експлуатаційних властивостей E_3 . Далі за формулою (6) розраховано інтегральний показник ефективності E_i , а з урахуванням коефіцієнтів умов застосування — приведений показник ефективності E_i^{36} .

Результати розрахунків свідчать про суттєву диференціацію альтернатив. Найвище значення інтегрального показника E_i отримано для БпАС-06 – 0,985. Високі значення також характерні для БпАС-11 – 0,839, БпАС-09 – 0,761 та БпАС-05 – 0,745. Для БпАС-08 інтегральний показник становить 0,609.

Після приведення до умов застосування найбільше значення E_i^{36} також має БпАС-06 – 0,883. Для БпАС-11 цей показник становить 0,688, БпАС-09 – 0,674, БпАС-05 – 0,631, БпАС-08 – 0,561, БпАС-04 – 0,459. Саме ці шість альтернатив перевищують установлене порогове значення $E_{\text{доп}} = 0,40$ і допускаються до подальшого ранжування.

Таким чином, за результатами попереднього відбору до множини допустимих альтернатив увійшли:

$$A_{\text{доп}} = \{A_{04}, A_{05}, A_{06}, A_{08}, A_{09}, A_{11}\}.$$

Зразки БпАС-01, БпАС-02, БпАС-03, БпАС-07, БпАС-10 та БпАС-12 не досягли встановленого порогового рівня і були виключені з подальшого ранжування незалежно від їхньої вартості.

Таблиця 3: Результати оцінювання ефективності розвідувальних БпАС

Зразок	E_1 – розвідувальні можливості	E_2 – живучість	E_3 – експлуатаційні властивості	E (6)	$K_{\text{реб}}$ (7)	E_{36} (8)
БпАС-01	0,066	0,106	0,064	0,078	0,727	0,052
БпАС-02	0,222	0,263	0,210	0,231	0,782	0,166
БпАС-03	0,408	0,475	0,414	0,430	0,836	0,331
БпАС-04	0,583	0,581	0,559	0,577	0,864	0,459
БпАС-05	0,750	0,738	0,746	0,745	0,918	0,631
БпАС-06	1,000	0,950	1,000	0,985	0,973	0,883
БпАС-07	0,145	0,619	0,145	0,287	0,945	0,250
БпАС-08	0,509	0,854	0,495	0,609	1,000	0,561
БпАС-09	0,676	0,851	0,805	0,761	0,962	0,674
БпАС-10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,700	0,000
БпАС-11	0,871	0,744	0,894	0,839	0,891	0,688
БпАС-12	0,302	0,246	0,320	0,290	0,755	0,201

Примітка: сірим тлом позначено зразки, що задовольняють пороговій умові (12) за $E_{\text{доп}} = 0,40$.

Для наочного представлення впливу умов застосування на результативність альтернатив проведено порівняння інтегрального показника ефективності E_i та його приведенного значення E_i^{36} . Графічне представлення результатів дає змогу визначити характер зниження потенційної ефективності БпАС під впливом прийнятих сценарних умов, а також виокремити альтернативи, що відповідають установленому мінімально допустимому рівню $E_{\text{доп}} = 0,40$ (рис. 2).

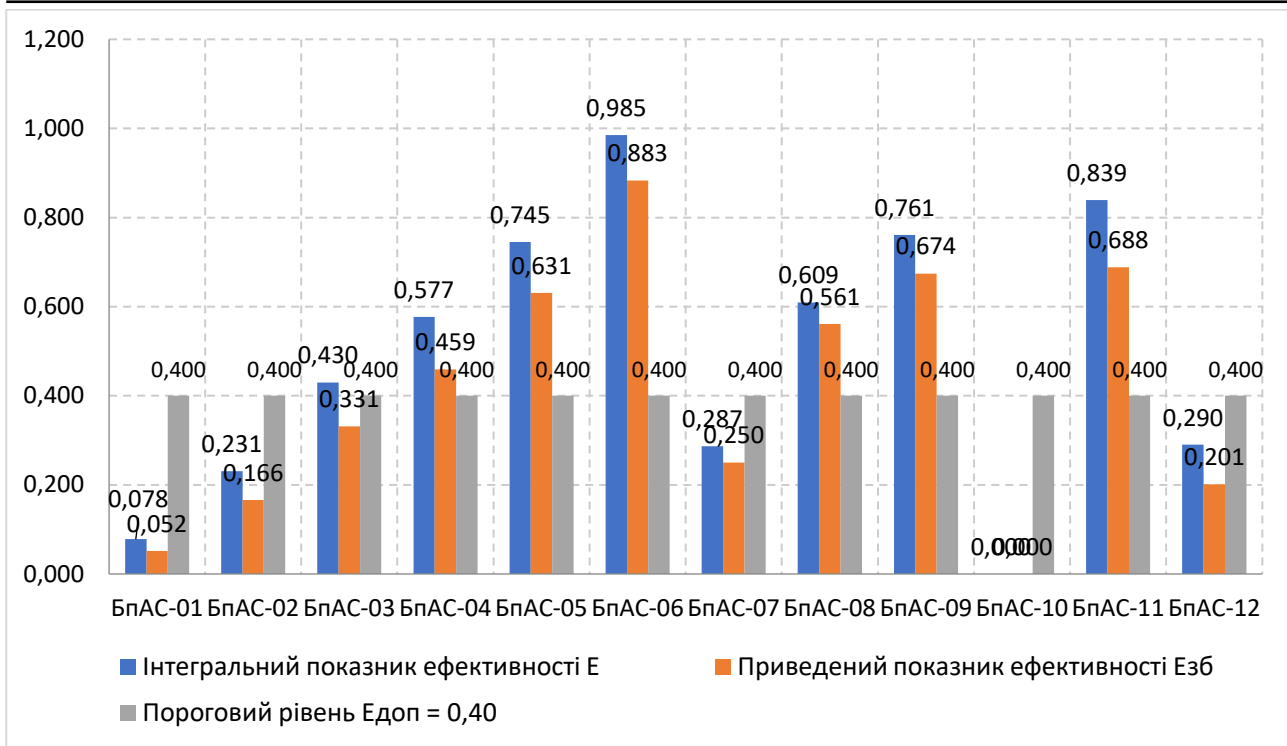


Рисунок 2: Порівняння інтегральної та приведеної ефективності розвідувальних БпАС
Джерело: розроблено авторами за результатами обчислювального експерименту.

Як, видно, з рис. 2, урахування умов застосування знижує розрахунковий рівень ефективності всіх досліджуваних альтернатив, однак не однаковою мірою. Після приведення інтегрального показника до заданих умов застосування встановленому пороговому рівню $E_{доп} = 0,40$ відповідають шість альтернатив: БпАС-04, БпАС-05, БпАС-06, БпАС-08, БпАС-09 та БпАС-11. Решта альтернатив виключаються з подальшого воєнно-економічного ранжування.

2. Оцінювання вартості життєвого циклу

Економічну складову оцінювання визначено на основі вартості життєвого циклу. Для кожної альтернативи враховано закупівельну вартість, витрати на наліт у межах призначеного ресурсу, витрати на підготовку розрахунку та технічне обслуговування впродовж встановленого строку експлуатації.

Розрахунки показали, що різниця між альтернативами за вартістю життєвого циклу є значною. Для БпАС-04 вона становить 257,8 тис. дол. США, для БпАС-08 — 219,3 тис. дол. США, для БпАС-09 — 436,0 тис. дол. США, для БпАС-11 — 879,8 тис. дол. США, а для БпАС-06 — 1367,5 тис. дол. США.

Отримані результати показують, що висока інтегральна ефективність не завжди супроводжується найкращою воєнно-економічною доцільністю. Зокрема, БпАС-06 має найвище значення приведеної ефективності, проте характеризується і найбільшою вартістю життєвого циклу серед допустимих альтернатив. Унаслідок цього його позиція істотно знижується після переходу до критерію “ефективність–вартість”.

3. Ранжування альтернатив за критерієм “ефективність–вартість”

Після порогового відбору допустимі альтернативи було ранжовано за критерієм

$$K_i = \frac{E_i^{36}}{\tilde{C}_i}.$$

Найвище значення критерію серед допустимих альтернатив отримав БпАС-08:

$$K_{08} = 0,0626.$$

Друге місце посів БпАС-04 із $K_{04} = 0,0435$, третє — БпАС-09 із $K_{09} = 0,0378$. Наступні позиції посіли БпАС-05 — 0,0293, БпАС-11 — 0,0191 та БпАС-06 — 0,0158.

Таким чином, раціональним зразком за базовим сценарієм визначено

$$A^* = A_{08}.$$

Перевага БпАС-08 зумовлена збалансованим співвідношенням між достатньо високою ефективністю та помірною вартістю життєвого циклу. На відміну від БпАС-06, який має вищу абсолютну ефективність, БпАС-08 забезпечує кращу ефективність на одиницю приведених витрат.

Перевірка умови практичної нерозрізненності за $\delta = 0,05$ показала, що жодна інша допустима альтернатива не входить до 5-відсоткової зони відносно максимального значення K . Найближчий конкурент БпАС-04 має значення критерію на 30,5 % нижче, ніж БпАС-08. Отже, за встановленими умовами вибір є однозначним.

Таблиця 4: Вартісні результати та ранжування за критерієм “ефективність–вартість”

Зразок	$C_{жц}$ (9), тис. дол. США	$C_{год}$ (10), дол. США /год	$\tilde{C}$ (11), разів	K_1	Ранг за K_1	Результат відбору
БпАС-01	35,2	488,3	1,44	0,0362	—	Відсіяно за умовою (12)
БпАС-02	64,8	449,7	2,65	0,0628	—	Відсіяно за умовою (12)
БпАС-03	145,5	433,0	5,95	0,0556	—	Відсіяно за умовою (12)
БпАС-04	257,8	421,3	10,55	0,0435	2	Допущений до ранжування
БпАС-05	525,8	521,6	21,50	0,0293	4	Допущений до ранжування
БпАС-06	1367,5	730,5	55,93	0,0158	6	Допущений до ранжування
БпАС-07	53,6	465,5	2,19	0,1141	—	Відсіяно за умовою (12)
БпАС-08	219,3	428,3	8,97	0,0626	1	Раціональний зразок A^*
БпАС-09	436,0	430,8	17,83	0,0378	3	Допущений до ранжування
БпАС-10	24,4	509,4	1,00	0,0000	—	Відсіяно за умовою (12)
БпАС-11	879,8	611,0	35,98	0,0191	5	Допущений до ранжування
БпАС-12	106,0	441,8	4,34	0,0465	—	Відсіяно за умовою (12)

Примітка: ранжування за критерієм K_i здійснюється лише для альтернатив, що відповідають установленій пороговій умові допустимості $E_i^{36} \geq E_{доп}$.

Результати табл. 4 свідчать, що максимальне значення критерію K_i серед усіх початкових альтернатив не є достатньою підставою для визначення раціонального зразка. Остаточне ранжування здійснюється лише в межах множини допустимих альтернатив, сформованої за результатами порогового відбору. Такий підхід унеможливорює вибір економічно привабливої, але функціонально недостатньої БпАС.

4. Значення порогового відбору

Результати обчислювального експерименту підтвердили необхідність попереднього порогового відбору альтернатив перед їх економічним ранжуванням.

Особливо показовим є БпАС-07. Формально цей зразок має найвище серед усіх 12 альтернатив значення критерію “ефективність–вартість”:

$$K_{07} = 0,1141,$$

що майже вдвічі перевищує значення для БпАС-08. Водночас його приведений показник ефективності становить лише

$$E_{07}^{36} = 0,250,$$

тобто не досягає встановленого порогового рівня 0,40. Через це БпАС-07 не включається до множини допустимих альтернатив.

Цей результат демонструє принципову відмінність між максимальною питомою економічною ефективністю і фактичною придатністю зразка до виконання заданого розвідувального завдання. Використання лише показника K_i без попередньої перевірки мінімально допустимого рівня ефективності могло б призвести до формально оптимального, але функціонально неприйнятного рішення.

Отже, пороговий відбір слід розглядати не як допоміжну операцію, а як обов’язковий етап запропонованого методу.

5. Аналіз співвідношення ефективності та вартості

Додаткове зіставлення альтернатив у площині “вартість життєвого циклу – приведений показник ефективності” показує, що БпАС-08 займає проміжну позицію між дешевими, але недостатньо ефективними системами та вискооефективними, однак суттєво дорожчими альтернативами.

Перехід від БпАС-08 до БпАС-09 забезпечує підвищення приведеної ефективності приблизно на 20,1 %, однак супроводжується збільшенням вартості життєвого циклу на 98,8 %. Перехід до БпАС-06 забезпечує зростання ефективності приблизно на 57,4 %, але потребує збільшення вартості життєвого циклу приблизно у 6,2 раза.

Для поглибленого аналізу воєнно-економічної доцільності альтернатив проведено їх позиціонування у двовимірному просторі “вартість життєвого циклу — приведена ефективність”. Такий підхід дає змогу одночасно оцінити рівень ефективності БпАС та ресурсні витрати, необхідні для його забезпечення, а також виявити альтернативи з найбільш збалансованим співвідношенням зазначених характеристик (рис. 3).

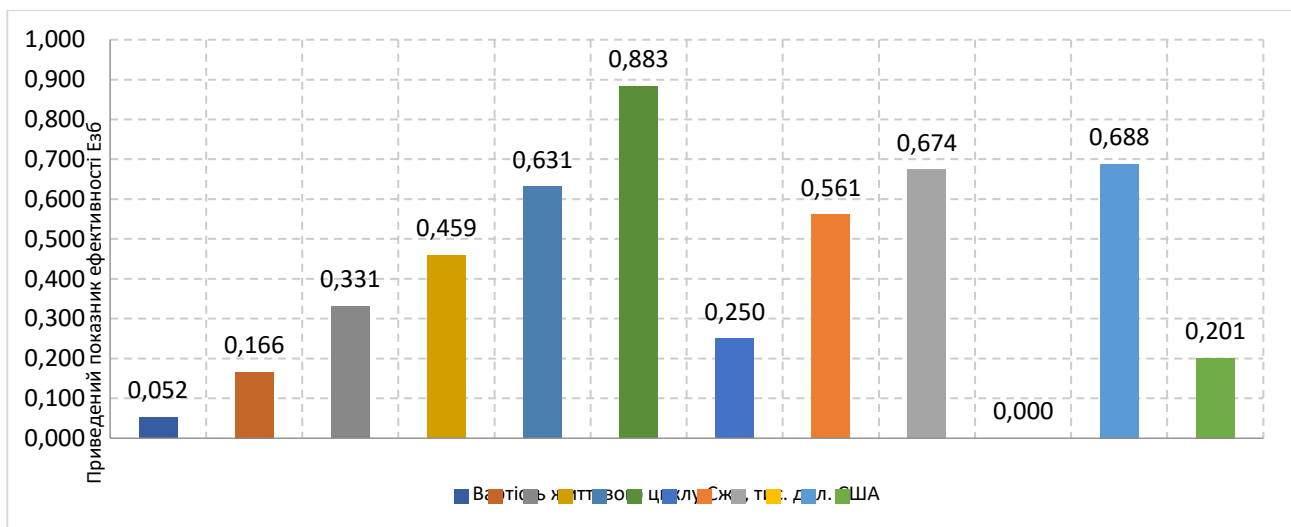


Рисунок 3: Співвідношення вартості життєвого циклу та приведеної ефективності розвідувальних БпАС

Джерело: розроблено авторами за результатами обчислювального експерименту.

Як видно з рис. 3, підвищення приведеної ефективності БпАС загалом супроводжується зростанням вартості її життєвого циклу, однак характер цього співвідношення є нелінійним. БпАС-06 забезпечує максимальне значення приведеної ефективності $E^{зб} = 0,883$, проте характеризується найбільшою вартістю життєвого циклу — 1367,5 тис. дол. США. Натомість БпАС-08 при $E^{зб} = 0,561$ має вартість життєвого циклу 219,3 тис. дол. США, що забезпечує більш збалансоване співвідношення ефективності та витрат. Саме це пояснює його першу позицію за прийнятим критерієм “ефективність–вартість”.

Це свідчить, що подальше підвищення абсолютної ефективності після рівня, забезпечуваного БпАС-08, супроводжується непропорційним зростанням витрат. Саме тому БпАС-08 у межах сформованої множини альтернатив характеризується найбільш збалансованим співвідношенням між ефективністю і вартістю.

6. Аналіз чутливості результатів

Для перевірки стійкості отриманого рішення проведено аналіз чутливості за п'ятьма розрахунковими варіантами:

- базове співвідношення ваг 0,45/0,30/0,25;
- підвищена вага розвідувальних можливостей 0,55/0,25/0,20;
- підвищена вага живучості 0,35/0,45/0,20;
- практично рівні ваги груп 0,34/0,33/0,33;
- жорсткіший сценарій радіоелектронної протидії з $K_0 = 0,55$.

У базовому варіанті значення критерію для трьох найкращих альтернатив становлять:

$$K_{08} = 0,0626, K_{04} = 0,0435, K_{09} = 0,0378.$$

За зміщення ваг на користь розвідувальних можливостей відповідні значення становлять 0,0609; 0,0436 та 0,0371. За підвищення ваги живучості – 0,0680; 0,0436 та 0,0388. За майже рівних ваг – 0,0635; 0,0434 та 0,0386. У жорсткішому сценарії РЕБ отримано 0,0626; 0,0401 та 0,0371 відповідно.

В усіх п'яти сценаріях перші три позиції залишилися незмінними:

$$\text{БпАС} - 08 \rightarrow \text{БпАС} - 04 \rightarrow \text{БпАС} - 09.$$

Отже, результати свідчать про стійкість вибору БпАС-08 у межах досліджених варіацій вагових коефіцієнтів та сценарного параметра K_0 . Саме так краще сформулювати висновок, а не стверджувати про загальну “робастність” моделі, оскільки перевірено лише п'ять заданих сценаріїв.

Для оцінювання чутливості результатів сформовано п'ять розрахункових сценаріїв, які передбачають зміну вагових коефіцієнтів груп критеріїв та інтенсивності радіоелектронної протидії. Значення $K_0 = 0,55$ у п'ятому сценарії прийнято як розрахункове припущення для моделювання більш жорстких умов РЕБ і не розглядається як універсальне нормативне значення.

Таблиця 5: Аналіз чутливості результатів оцінювання

Розрахунковий варіант	БпАС-08	БпАС-04	БпАС-09	Раціональний зразок
Базовий (0,45 / 0,30 / 0,25)	0,0626	0,0435	0,0378	БпАС-08
Акцент на розвідувальні можливості (0,55 / 0,25 / 0,20)	0,0609	0,0436	0,0371	БпАС-08
Акцент на живучість (0,35 / 0,45 / 0,20)	0,0680	0,0436	0,0388	БпАС-08
Рівні ваги груп (0,34 / 0,33 / 0,33)	0,0635	0,0434	0,0386	БпАС-08
Жорсткий сценарій РЕБ ($K_0 = 0,55$)	0,0626	0,0401	0,0371	БпАС-08

Джерело: розроблено авторами за результатами обчислювального експерименту.

Результати аналізу чутливості показали, що в усіх п'яти досліджених сценаріях перші три позиції ранжування залишаються незмінними: БпАС-08 посідає перше місце, БпАС-04 – друге, БпАС-09 – третє. Зміна вагових коефіцієнтів груп показників та посилення сценарію радіоелектронної протидії впливають на абсолютні значення критерію K_i , однак у межах досліджених варіацій не змінюють порядок трьох провідних альтернатив. Отже, вибір БпАС-08 можна вважати стійким у межах перевіреного діапазону параметрів моделі.

7. Узагальнення отриманих результатів

Проведений обчислювальний експеримент показав, що запропонований підхід дає змогу послідовно розмежувати три різні аспекти вибору розвідувальної БпАС: відповідність мінімально необхідному рівню ефективності, абсолютний рівень техніко-експлуатаційних характеристик та воєнно-економічну доцільність альтернативи.

За результатами розрахунків із 12 початкових альтернатив шість відповідали встановленому пороговому рівню ефективності. Серед допустимих зразків найбільше значення критерію “ефективність–вартість” отримав БпАС-08 — $K = 0,0626$, що дозволило визначити його як раціональну альтернативу для базового сценарію.

Разом з тим отриманий результат слід інтерпретувати як демонстрацію працездатності методу на умовних вихідних даних, а не як емпіричну верифікацію переваги конкретного реального зразка БпАС. Практичне застосування методу потребує використання фактичних тактико-технічних, експлуатаційних та вартісних характеристик конкретних систем, а також уточнення порогових і сценарних параметрів відповідно до змісту поставленого розвідувального завдання.

Обговорення

Отримані результати підтверджують доцільність поєднання багатокритеріального оцінювання технічних та експлуатаційних характеристик розвідувальних БпАС із вартісною складовою та попереднім пороговим відбором альтернатив. Проведений обчислювальний експеримент показав, що ранжування лише за абсолютним рівнем ефективності або лише за питомим показником “ефективність–вартість” може приводити до різних і навіть методично суперечливих рішень.

За інтегральним показником найбільш ефективним у базовому сценарії є БпАС-06: значення $E = 0,985$, а приведенного показника $E^{зб} = 0,883$. Водночас вартість його життєвого циклу становить 1367,5 тис. дол. США, унаслідок чого за критерієм “ефективність–вартість” цей зразок займає лише шосте місце серед допустимих альтернатив із $K = 0,0158$. Натомість БпАС-08 при меншому значенні приведеної ефективності $E^{зб} = 0,561$ має суттєво нижчу вартість життєвого циклу — 219,3 тис. дол. США — та найбільше серед допустимих альтернатив значення критерію $K = 0,0626$.

Такий результат свідчить, що найбільш технічно досконалий зразок не обов'язково є найбільш раціональним з воєнно-економічної точки зору. Вибір має здійснюватися не за максимальним значенням окремого показника, а за збалансованим співвідношенням спроможностей і ресурсів, необхідних для їх забезпечення. Саме в цьому полягає практичний зміст використання критерію “ефективність–вартість” у задачах обґрунтування закупівлі або розвитку БпАС.

Особливо важливим результатом є підтвердження необхідності порогового відбору альтернатив до проведення економічного ранжування. БпАС-07 має формально найвище серед усіх досліджених альтернатив значення критерію $K = 0,1141$, однак його приведений показник ефективності становить лише 0,250 за встановленого мінімально допустимого рівня $E_{\text{доп}} = 0,40$. Отже, включення такого зразка до остаточного ранжування призвело б до переваги економічно привабливої, але функціонально недостатньої альтернативи. У дослідженні саме з цієї причини до

подальшого ранжування допущено лише шість із дванадцяти зразків: БпАС-04, БпАС-05, БпАС-06, БпАС-08, БпАС-09 та БпАС-11.

Цей результат має принципове методичне значення. Питомий критерій не повинен застосовуватися до всієї початкової множини альтернатив без попередньої перевірки їх придатності до виконання визначеного завдання. Економічна перевага не може компенсувати невиконання мінімально необхідних вимог до розвідувальних можливостей, живучості або інших критичних характеристик. Тому запропонована послідовність “допустимість — ранжування — вибір” є більш обґрунтованою, ніж безпосередня максимізація показника K_i .

Важливим чинником, що впливає на результати оцінювання, є врахування умов радіоелектронної протидії. У моделі цей вплив реалізується через сценарний коефіцієнт $K_{РЕБ}$, який модифікує інтегральний показник відповідно до рівня технічної захищеності конкретного зразка та заданої інтенсивності протидії. Для базового сценарію прийнято $K_0 = 0,70$, а для жорсткішого сценарію аналізу чутливості — $K_0 = 0,55$.

Результати показують, що врахування радіоелектронної протидії може істотно змінювати відносні переваги альтернатив. Водночас значення K_0 , $K_{мет}$ та $K_{місц}$, використані в розрахунковому експерименті, є сценарними параметрами, а не універсальними нормативними величинами. У самій моделі передбачено, що вони повинні уточнюватися залежно від конкретного району застосування, прогнозованої інтенсивності протидії та наявних емпіричних даних. Це обмежує можливість прямого перенесення отриманих числових результатів на інші сценарії, але водночас забезпечує адаптивність методу.

Окремої уваги заслуговує вартість життєвого циклу. Результати розрахунків демонструють, що використання лише закупівельної ціни не відображає повного економічного навантаження, пов'язаного із застосуванням БпАС. У моделі враховуються закупівельна вартість, витрати на наліт у межах призначеного ресурсу, витрати на підготовку розрахунку та технічне обслуговування протягом строку експлуатації. За таких умов зразки з високою початковою ціною, значним ресурсом або тривалим строком експлуатації можуть суттєво змінювати своє положення у рейтингу порівняно з оцінюванням лише за ціною придбання.

Разом із тим запропонована модель вартості життєвого циклу має спрощений характер. Вона не охоплює всі можливі складові витрат, зокрема витрати на запасні частини, ремонт після бойових пошкоджень, програмне забезпечення, модернізацію, засоби зв'язку, втрати внаслідок бойового вибуття та утилізацію. Тому для практичного використання в оборонному плануванні та закупівлях структура $C_{жц}$ має уточнюватися відповідно до наявності фактичних даних і прийнятого горизонту оцінювання.

Додаткове підтвердження обґрунтованості вибору БпАС-08 отримано під час аналізу чутливості. У п'яти досліджених розрахункових варіантах — базовому, із підвищеною вагою розвідувальних можливостей, із підвищеною вагою живучості, за майже рівних ваг груп та за жорсткішого сценарію РЕБ — перше місце зберігалося за БпАС-08. Другу і третю позиції відповідно займали БпАС-04 та БпАС-09. Отже, вибір БпАС-08 є стійким у межах досліджених варіацій параметрів моделі, але це не слід трактувати як абсолютну нечутливість результату до будь-яких змін вихідних даних.

Обмеженням проведеного аналізу чутливості є те, що він охоплює лише п'ять заздалегідь визначених сценаріїв. Для подальшого розвитку методу доцільно доповнити його перевіркою чутливості до зміни порогового значення $E_{доп}$, меж нормування, складу множини альтернатив, вартості життєвого циклу та значень окремих часткових показників. Окремо доцільно перевіряти стійкість ранжування при додаванні або вилученні альтернатив, оскільки застосоване min–max нормування залежить від складу порівнюваної множини.

Важливо також враховувати, що вихідні характеристики дванадцяти БпАС у проведеному експерименті мають умовний характер і узагальнюють типові системи різних класів. Тому

отриманий рейтинг не може розглядатися як рекомендація щодо закупівлі конкретного реального зразка. Його призначення полягає в демонстрації працездатності запропонованої процедури та виявленні її поведінки за різних співвідношень характеристик і витрат.

Отже, результати обчислювального експерименту підтверджують працездатність запропонованого методу як інструменту підтримки прийняття рішень. Його перевагою є послідовне поєднання багатокритеріальної оцінки характеристик БпАС, урахування умов застосування, вартості життєвого циклу, порогової допустимості та критерію “ефективність–вартість”. Водночас метод не замінює професійного рішення органу військового управління, а створює формалізовану основу для порівняння альтернатив і пояснення причин переваги одного варіанта над іншим.

Висновки

У дослідженні розроблено метод воєнно-економічного оцінювання розвідувальних безпілотних авіаційних систем, призначений для обґрунтування вибору раціонального зразка з урахуванням його розвідувальних можливостей, живучості, експлуатаційних властивостей, умов застосування та вартості життєвого циклу. На відміну від підходів, за яких технічні та економічні характеристики розглядаються відокремлено, запропонований метод передбачає їх послідовне агрегування в єдиній процедурі оцінювання.

Систему критеріїв сформовано за ієрархічним принципом. Вона охоплює три групи характеристик – розвідувальні можливості, живучість та експлуатаційні властивості – і дев'ять часткових показників. Вагові коефіцієнти визначено із застосуванням методу аналізу ієрархій на основі групового експертного оцінювання за участю 12 фахівців. Така структура дає змогу враховувати неоднакову значущість окремих характеристик під час формування інтегральної оцінки БпАС.

Запропонована процедура вибору передбачає нормування вихідних характеристик, визначення групових та інтегрального показників ефективності, приведення оцінки до заданих умов застосування, визначення вартості життєвого циклу, перевірку відповідності альтернатив установленому пороговому рівню ефективності та подальше ранжування допустимих зразків за критерієм “ефективність–вартість”. Принциповою особливістю методу є те, що економічне ранжування здійснюється лише після виключення альтернатив, які не забезпечують мінімально необхідного рівня ефективності.

Апробацію методу проведено на множині з 12 умовних розвідувальних БпАС. За базового сценарію шість альтернатив перевищили встановлений пороговий рівень $E_{\text{доп}} = 0,40$ і були допущені до подальшого воєнно-економічного порівняння. За результатами ранжування найбільше значення критерію “ефективність–вартість” серед допустимих альтернатив отримано для БпАС-08 – $K = 0,0626$. Наступні позиції посіли БпАС-04 – $K = 0,0435$ та БпАС-09 – $K = 0,0378$.

Встановлено, що максимальна абсолютна ефективність зразка не гарантує його воєнно-економічної переваги. БпАС-06 характеризується найвищим приведеним показником ефективності $E^{36} = 0,883$, проте значна вартість життєвого циклу знижує його позицію за критерієм “ефективність–вартість”. Водночас БпАС-08 забезпечує більш збалансоване співвідношення ефективності та витрат, що зумовлює його перше місце серед допустимих альтернатив.

Підтверджено також необхідність порогового відбору. БпАС-07 має найвище серед усієї початкової множини значення питомого критерію $K = 0,1141$, однак його приведена ефективність $E^{36} = 0,250$ не відповідає встановленому мінімально допустимому рівню. Це свідчить, що безпосередня максимізація співвідношення “ефективність–вартість” без

попередньої перевірки функціональної придатності може призвести до вибору дешевшої, але недостатньо ефективної системи.

Аналіз чутливості показав, що БпАС-08 зберігає першу позицію в усіх п'яти досліджених варіантах зміни вагових коефіцієнтів та сценарного параметра радіоелектронної протидії. Отриманий результат свідчить про стійкість вибору в межах досліджених варіацій параметрів моделі, але не є підставою для висновку про абсолютну стійкість ранжування за будь-яких змін вихідних даних.

Практичне значення запропонованого методу полягає в можливості його використання як інструменту підтримки прийняття рішень під час попереднього порівняння альтернативних розвідувальних БпАС, обґрунтування закупівель та формування пропозицій щодо розвитку відповідних спроможностей. Метод дає змогу не лише сформувати рейтинг альтернатив, а й простежити, якою мірою на кінцевий результат впливають технічні характеристики, умови застосування та витрати.

Разом із тим результати дослідження мають визначені обмеження. Обчислювальний експеримент проведено на умовних вихідних даних, тому отриманий рейтинг не може безпосередньо використовуватися для обґрунтування закупівлі конкретних реальних систем. Крім того, застосована модель вартості життєвого циклу має спрощений характер, а результати min–max нормування залежать від складу множини порівнюваних альтернатив.

Перспективи подальших досліджень полягають в апробації методу на фактичних характеристиках розвідувальних БпАС, уточненні структури вартості життєвого циклу з урахуванням ремонту, запасних частин, модернізації та втрат під час експлуатації, обґрунтуванні референтних меж нормування, а також у розширенні аналізу чутливості до зміни складу альтернатив, порогового рівня ефективності та сценаріїв радіоелектронної протидії.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Під час підготовки рукопису застосовувалися інструменти генеративного штучного інтелекту для структурування матеріалу та мовно-стилістичного редагування. Автор самостійно перевірено джерела, фактичні дані, формули, наукові положення та висновки. Відповідальність за зміст роботи несе автор.

Список використаних джерел

1. Kunertova, D. (2023). Drones have boots: Learning from Russia's war in Ukraine. *Contemporary Security Policy*, 44(4), 576–591. <https://doi.org/10.1080/13523260.2023.2262792>
2. Terzić, M. (2022). Critical review of the protection of aircraft defense forces during the conflict in Nagorno Karabakh in 2020. *Small Wars & Insurgencies*, 33(6), 1017–1031. <https://doi.org/10.1080/09592318.2021.2025286>
3. DeVore, M. R. (2023). "No end of a lesson:" Observations from the first high-intensity drone war. *Defense & Security Analysis*, 39(2), 263–266. <https://doi.org/10.1080/14751798.2023.2178571>
4. Lehtonen, J. M., & Virtanen, K. (2022). Choosing the most economically advantageous tender using a multi-criteria decision analysis approach. *Journal of Public Procurement*, 22(2), 164–179. <https://doi.org/10.1108/JOPP-06-2021-0040>

5. McIvor, L., & Chakraborty, R. K. (2022). Multi-criteria decision making in a multi-method framework with application in capability acquisition and enhancement. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1816–1821. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.662>
6. Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
7. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
8. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
9. Dağdeviren, M., Yavuz, S., & Kılınç, N. (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8143–8151. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.10.016>
10. Hamurcu, M., & Eren, T. (2020). Selection of unmanned aerial vehicles by using multicriteria decision-making for defence. *Journal of Mathematics*, 2020, Article 4308756. <https://doi.org/10.1155/2020/4308756>
11. Keleş, N. (2024). A comparative evaluation of multi-criteria decision-making framework for armed unmanned aerial vehicle. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 12(4), 433–453. <https://doi.org/10.1108/IJIUS-03-2023-0026>
12. Erkeç, T. Y., Erdoğan, F. A., Aygün, S., & Sağbaş, M. (2025). UAV selection using fuzzy AHP and PROMETHEE method. *Journal of Aviation*, 9(1), 13–18. <https://doi.org/10.30518/jav.1545474>
13. Smit, M. C. (2012). A North Atlantic Treaty Organisation framework for life cycle costing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(4–5), 444–456. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2011.562541>
14. Mardo, M. (2024). The principles of life cycle costing of the assets of the defence forces. *Sõjateadlane. The Estonian Journal of Military Studies*, 19. <https://doi.org/10.15157/st.vi19.24131>
15. Mazur, V. (2026). Analysis of existing methods for calculating the cost of the stage of use of weapons and military equipment in the system of their life cycle management. *Social Development and Security*, 16(2). <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.27>
16. Díaz Cuesta, M., Soto, S. V., & Vera, C. J. V. (2026). Forecasting life cycle costs of weapon systems: An open source approach with artificial intelligence. *Journal of Forecasting*, 45(5), 2606–2628. <https://doi.org/10.1002/for.70151>
17. NATO Research and Technology Organization. (2003). *Cost structure and life cycle costs for military systems* (RTO Technical Report TR-058). NATO Research and Technology Organization.
18. Steen, R., Håheim-Saers, N., & Aukland, G. (2024). Military unmanned aerial vehicle operations through the lens of a high-reliability system: Challenges and opportunities. *Risk, Hazards, & Crisis in Public Policy*, 15, 347–373. <https://doi.org/10.1002/rhc3.12279>
19. Ren, J., Xing, L., & Lin, Y.-K. (2026). Unmanned aerial vehicles-based mission reliability in collaborative, heterogeneous, and dynamic environments. *Quality and Reliability Engineering International*, 42(1), 173–184. <https://doi.org/10.1002/qre.70068>
20. Guo, J., & Elsayed, E. A. (2019). Reliability of balanced multi-level unmanned aerial vehicles. *Computers & Operations Research*, 106, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.013>
21. Petritoli, E., Leccese, F., & Ciani, L. (2018). Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 18(9), 3171. <https://doi.org/10.3390/s18093171>
22. Clothier, R. A., Williams, B. P., & Fulton, N. L. (2017). Unmanned aerial vehicle safety assessment modelling through Petri Nets. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.06.021>

23. Usage of noise jamming techniques for the unmanned aerial vehicle self-protection electronic warfare system against frequency agile radars. (2025). *Franklin Open*, 12, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100306>

References

1. Kunertova, D. (2023). Drones have boots: Learning from Russia's war in Ukraine. *Contemporary Security Policy*, 44(4), 576–591. <https://doi.org/10.1080/13523260.2023.2262792>
2. Terzić, M. (2022). Critical review of the protection of aircraft defense forces during the conflict in Nagorno Karabakh in 2020. *Small Wars & Insurgencies*, 33(6), 1017–1031. <https://doi.org/10.1080/09592318.2021.2025286>
3. DeVore, M. R. (2023). "No end of a lesson:" Observations from the first high-intensity drone war. *Defense & Security Analysis*, 39(2), 263–266. <https://doi.org/10.1080/14751798.2023.2178571>
4. Lehtonen, J. M., & Virtanen, K. (2022). Choosing the most economically advantageous tender using a multi-criteria decision analysis approach. *Journal of Public Procurement*, 22(2), 164–179. <https://doi.org/10.1108/JOPP-06-2021-0040>
5. Mclvor, L., & Chakraborty, R. K. (2022). Multi-criteria decision making in a multi-method framework with application in capability acquisition and enhancement. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1816–1821. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.662>
6. Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
7. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
8. Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
9. Dağdeviren, M., Yavuz, S., & Kılınç, N. (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8143–8151. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.10.016>
10. Hamurcu, M., & Eren, T. (2020). Selection of unmanned aerial vehicles by using multicriteria decision-making for defence. *Journal of Mathematics*, 2020, Article 4308756. <https://doi.org/10.1155/2020/4308756>
11. Keleş, N. (2024). A comparative evaluation of multi-criteria decision-making framework for armed unmanned aerial vehicle. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*, 12(4), 433–453. <https://doi.org/10.1108/IJIUS-03-2023-0026>
12. Erkeç, T. Y., Erdoğan, F. A., Aygün, S., & Sağbaş, M. (2025). UAV selection using fuzzy AHP and PROMETHEE method. *Journal of Aviation*, 9(1), 13–18. <https://doi.org/10.30518/jav.1545474>
13. Smit, M. C. (2012). A North Atlantic Treaty Organisation framework for life cycle costing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(4–5), 444–456. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2011.562541>
14. Mardo, M. (2024). The principles of life cycle costing of the assets of the defence forces. *Sõjateadlane. The Estonian Journal of Military Studies*, 19. <https://doi.org/10.15157/st.vi19.24131>
15. Mazur, V. (2026). Analysis of existing methods for calculating the cost of the stage of use of weapons and military equipment in the system of their life cycle management. *Social Development and Security*, 16(2). <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.27>
16. Díaz Cuesta, M., Soto, S. V., & Vera, C. J. V. (2026). Forecasting life cycle costs of weapon systems: An open source approach with artificial intelligence. *Journal of Forecasting*, 45(5), 2606–2628. <https://doi.org/10.1002/for.70151>

17. NATO Research and Technology Organization. (2003). *Cost structure and life cycle costs for military systems* (RTO Technical Report TR-058). NATO Research and Technology Organization.
18. Steen, R., Håheim-Saers, N., & Aukland, G. (2024). Military unmanned aerial vehicle operations through the lens of a high-reliability system: Challenges and opportunities. *Risk, Hazards, & Crisis in Public Policy*, 15, 347–373. <https://doi.org/10.1002/rhc3.12279>
19. Ren, J., Xing, L., & Lin, Y.-K. (2026). Unmanned aerial vehicles-based mission reliability in collaborative, heterogeneous, and dynamic environments. *Quality and Reliability Engineering International*, 42(1), 173–184. <https://doi.org/10.1002/qre.70068>
20. Guo, J., & Elsayed, E. A. (2019). Reliability of balanced multi-level unmanned aerial vehicles. *Computers & Operations Research*, 106, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.013>
21. Petritoli, E., Leccese, F., & Ciani, L. (2018). Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 18(9), 3171. <https://doi.org/10.3390/s18093171>
22. Clothier, R. A., Williams, B. P., & Fulton, N. L. (2017). Unmanned aerial vehicle safety assessment modelling through Petri Nets. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.06.021>
23. *Usage of noise jamming techniques for the unmanned aerial vehicle self-protection electronic warfare system against frequency agile radars*. (2025). *Franklin Open*, 12, 100306. <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100306>



This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.