Метод оцінювання ефективності застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів на основі зонального підходу

A Zone-Based Method for Assessing the Effectiveness of Reconnaissance Unmanned Aerial Vehicles

Олег Семененко [A]
Corresponding author: Заслужений діяч науки і техніки України, д. військ. н., професор, заступник начальника інституту, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6477-3414

Юзеф Добровольський [B]
кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри, e-mail: kataza@i.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1077-1402

Володимир Коваль [A]
кандидат військових наук, старший науковий співробітник, науковий співробітник, e-mail: vladimerkoval69@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6209-6779

Андрій Голованов [C]
кандидат військових наук, доцент, заступник начальника інституту, e-mail: aboplan62@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6251-570X

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

Марія Ярмольчик [B]
доктор філософії, начальник науково-дослідної лабораторії, e-mail: LinkinFan357@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9917-0189

Oleh Semenenko [A]
Corresponding author: Dr. of Military Sciences, Professor, Deputy Head of the Institute, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6477-3414

Yuzef Dobrovolskyi [B]
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: kataza@i.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1077-1402

Volodymyr Koval [A]
Candidate of Military Sciences, Senior Researcher, research fellow, e-mail: vladimerkoval69@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6209-6779

Andrii Holovanov [C]
Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Institute, e-mail: aboplan62@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6251-570X

Artem Remez[C]
PhD, Professor of the Department of Operational Art, e-mail: remez.art.86@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4970-1097

Mariia Yarmolchyk [B]
Doctor of Philosophy, Head of the Research Laboratory, e-mail: LinkinFan357@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9917-0189

[A] Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ, Україна
[B] Кафедра військової підготовки Державного університету "Київський авіаційний університет", м. Київ, Україна
[C] 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] National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: September 27, 2026 | Revised: October 29, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК 623.746-519:355.40:519.87

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.37

Мета роботи. Розробити метод оцінювання ефективності застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів на основі зонального підходу з урахуванням умов ведення видової повітряної розвідки, розвідувальних можливостей, живучості та воєнно-економічних характеристик зразків.

Метод дослідження. Використано системний аналіз, декомпозицію, математичне моделювання, теорію пошуку, критерії Джонсона, метод аналізу ієрархій, багатокритеріальне оцінювання та воєнно-економічний аналіз.

Результати дослідження. Запропоновано поділ простору ведення видової повітряної розвідки на шість зон із диференційованими умовами застосування. Сформовано систему з п'яти показників: продуктивність оглядової та детальної розвідки, достовірність ідентифікації об'єктів, оперативність отримання відомостей та живучість. Розроблено аналітичні моделі визначення показників і процедуру їх нормування відносно нормативних потреб відповідної зони. Запропоновано підхід до оцінювання вартості забезпечення необхідної розвідувальної

Purpose. To develop a method for evaluating the effectiveness of reconnaissance unmanned aerial vehicles based on a zonal approach, considering the conditions of imagery reconnaissance operations, reconnaissance capabilities, survivability, and military-economic characteristics of the systems.

Method. The study employs systems analysis, decomposition, mathematical modeling, search theory, Johnson's criteria, the Analytic Hierarchy Process, multicriteria evaluation, and military-economic analysis.

Results. A division of the imagery reconnaissance operational area into six zones with differentiated operating conditions is proposed. A system of five performance indicators is established: wide-area reconnaissance productivity, detailed reconnaissance productivity, target identification reliability, information timeliness, and survivability. Analytical models for calculating these indicators and a procedure for normalizing them against zone-specific operational requirements are developed. An approach to estimating the cost of providing the required reconnaissance capability is

спроможності та формалізовано процедуру порівняння альтернативних зразків.

Теоретична цінність дослідження. Удосконалено методичний підхід до комплексного оцінювання розвідувальних безпілотних літальних апаратів шляхом поєднання зональної диференціації умов застосування, нормування показників і воєнно-економічного аналізу.

Практична цінність дослідження. Запропонований метод може використовуватися для обґрунтування вибору розвідувальних безпілотних авіаційних комплексів, планування оборонних закупівель і формування раціонального типорозмірного ряду зразків.

Обмеження дослідження. Метод потребує калібрування параметрів протидії та перевірки результатів на емпіричних даних.

Тип статті: методична стаття.

Ключові слова. розвідка, безпілотник, ефективність, зонування, живучість, моделювання, оцінювання.

proposed, and a procedure for comparing alternative unmanned aerial vehicle systems is formalized.

Theoretical Implications. The methodological framework for comprehensive evaluation of reconnaissance unmanned aerial vehicles is improved by integrating zonal differentiation of operating conditions, performance indicator normalization, and military-economic analysis.

Practical Implications. The proposed method can support the selection of reconnaissance unmanned aerial systems, defense procurement planning, and the development of a rational range of system types and sizes.

Limitations. The method requires calibration of threat-related parameters and validation of its results using empirical data.

Paper type. Methodological Article.

Key words. reconnaissance, drone, effectiveness, zoning, survivability, modeling, evaluation.

Вступ

Досвід російсько-української війни засвідчує суттєве зростання ролі безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) у системі розвідки та вогневого ураження противника. Розвідувальні безпілотні літальні апарати (БпЛА) забезпечують отримання відомостей про розташування, стан і характер діяльності об’єктів противника, а також спостереження за змінами обстановки в районах виконання бойових завдань. Повнота, достовірність і своєчасність розвідувальної інформації значною мірою визначають результативність застосування артилерійських, ракетних та інших засобів вогневого ураження. Водночас розвиток засобів протиповітряної оборони (ППО), радіоелектронної боротьби (РЕБ) і спеціалізованих систем протидії безпілотним літальним апаратам істотно ускладнює ведення видової повітряної розвідки та підвищує ризик втрати розвідувальних засобів. За наведеними в літературі оцінками, у 2023 році втрати безпілотників під час бойових дій могли сягати близько 10 тис. апаратів на місяць [1]. За таких умов ефективність використання безпілотних систем залежить не лише від їхніх технічних характеристик, а й від відповідності конкретних зразків умовам і завданням застосування [2].

Сучасні розвідувальні БпАК характеризуються значною різноманітністю конструктивних рішень, технічних характеристик і функціональних можливостей. Вони відрізняються дальністю дії, тривалістю польоту, характеристиками оптико-електронного обладнання, продуктивністю огляду місцевості, завадозахищеністю, живучістю та вартістю. Така різноманітність розширює можливості вибору засобів розвідки, проте водночас ускладнює обґрунтування рішень щодо їх закупівлі, розподілу та застосування. Вибір зразків лише за окремими тактико-технічними характеристиками не завжди забезпечує досягнення необхідної розвідувальної спроможності та може призводити до нераціонального використання оборонних ресурсів.

Особливого значення набуває врахування відмінностей умов ведення видової повітряної розвідки залежно від глибини виконання завдань. У тактичній, оперативній та стратегічній глибині змінюються характер об’єктів розвідки, вимоги до якості та періодичності оновлення відомостей, склад і можливості засобів протидії, а також організаційні й технічні умови застосування БпЛА. Зразок, який забезпечує високу результативність під час виконання завдань на незначній відстані від лінії бойового зіткнення, може виявитися недостатньо ефективним на більшій глибині через обмеження дальності управління, тривалості польоту або стійкості до засобів протидії. Водночас використання складних і дорогих платформ для виконання завдань, які можна виконати менш витратними засобами, не завжди є економічно обґрунтованим.

У таких умовах виникає необхідність застосування диференційованого підходу до оцінювання ефективності розвідувальних БпЛА, який враховує особливості конкретних районів і завдань розвідки. Одним із можливих напрямів розв’язання цієї проблеми є зональний підхід, що передбачає поділ простору ведення розвідки на зони з відмінними умовами застосування та встановлення відповідних вимог до розвідувальних можливостей. Його використання створює передумови для оцінювання зразків за єдиною системою показників із диференціацією нормативних значень і вагових коефіцієнтів відповідно до особливостей кожної зони.

Важливим методичним питанням є формування системи показників, що комплексно характеризує результативність застосування розвідувальних БпЛА. Ефективність видової повітряної розвідки не може бути повною мірою визначена одним показником, оскільки вона залежить від продуктивності огляду місцевості, можливостей детального обстеження об'єктів, достовірності їх ідентифікації, оперативності отримання відомостей і живучості літального апарата. При цьому значущість окремих характеристик змінюється залежно від умов виконання завдань. Тому оцінювання має ґрунтуватися на комплексному врахуванні зазначених властивостей та їх відповідності встановленим потребам.

Додатковою методичною проблемою є забезпечення порівнюваності результатів оцінювання. У багатокритеріальних методах нормування показників нерідко здійснюється відносно найкращих характеристик серед порівнюваних зразків. За такого підходу зміна складу множини альтернатив може впливати на нормовані значення показників і результати ранжування. Нормування відносно попередньо встановлених нормативних потреб дозволяє зменшити зазначену залежність і забезпечити порівнюваність індивідуальних оцінок за незмінних умов застосування та нормативних вимог.

Не менш важливим є воєнно-економічний аспект оцінювання. Закупівельна ціна окремого БпЛА не відображає повною мірою витрат на забезпечення необхідного обсягу розвідувальної інформації. Для обґрунтованого порівняння зразків необхідно враховувати їхню продуктивність, технічну готовність, можливість багаторазового застосування, експлуатаційні витрати, ризик втрат і потребу у відновленні парку. Це зумовлює доцільність використання вартості забезпечення необхідної розвідувальної спроможності як економічної основи для порівняння альтернативних варіантів.

Отже, наукова проблема полягає в необхідності вдосконалення методичного апарату оцінювання ефективності застосування розвідувальних БпЛА шляхом комплексного врахування зональних відмінностей умов ведення видової повітряної розвідки, формування порівнюваної системи показників розвідувальних можливостей і живучості та поєднання результатів їх оцінювання з воєнно-економічними характеристиками.

Метою дослідження є розроблення методу оцінювання ефективності застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів на основі зонального підходу, який враховує відмінності умов ведення видової повітряної розвідки на різних глибинах, забезпечує комплексне оцінювання розвідувальних можливостей і живучості зразків та їх воєнно-економічне порівняння для обґрунтування раціонального типорозмірного ряду безпілотних авіаційних комплексів.

Огляд літератури

Проблематика оцінювання ефективності застосування безпілотних авіаційних комплексів досліджується в межах розвитку методів багатокритеріального аналізу, теорії пошуку, математичного моделювання бойових дій, оцінювання живучості літальних апаратів, а також воєнно-економічного обґрунтування озброєння та військової техніки. Наявні наукові підходи дозволяють визначати окремі характеристики ефективності розвідувальних БпЛА, однак

відрізняються складом показників, способами їх нормування, урахуванням умов застосування та принципами формування інтегральної оцінки.

У дослідженні О. В. Єфремова та О. А. Коршця [6] запропоновано методику вибору раціонального типу й варіанта обладнання БпЛА на основі поєднання методу аналізу ієрархій із медіаною Кемені. Застосування такого підходу спрямоване на підвищення узгодженості експертних оцінок і зменшення впливу суб'єктивних суджень під час порівняння альтернативних зразків. Водночас основну увагу приділено процедурі багатокритеріального вибору, тоді як залежність ефективності від просторових умов виконання розвідувальних завдань потребує додаткового врахування.

Т. Кравець, О. Полець та О. Анікольчук [7], використовуючи SWOT-аналіз і результати узагальнення досвіду бойового застосування, обґрунтували орієнтовні вимоги до безпілотних авіаційних комплексів артилерійської розвідки. Зокрема, розглянуто характеристики дальності дії, тривалості польоту, оптичного збільшення, наявності тепловізійного каналу та захисту від засобів РЕБ. Практичне значення зазначеного дослідження полягає у визначенні вимог до розвідувальних систем відповідно до характеру виконуваних завдань. Однак сформовані вимоги не є універсальним інструментарієм для кількісного порівняння ефективності зразків у різних умовах застосування.

Найближчим до проблематики цієї статті є дослідження [8], у якому запропоновано метод воєнно-економічного оцінювання розвідувальних безпілотних авіаційних систем. У межах зазначеного підходу використано дев'ять часткових показників, об'єднаних у групи розвідувальних можливостей, живучості та експлуатаційних характеристик. Формування інтегрального показника здійснюється із застосуванням вагових коефіцієнтів, визначених методом аналізу ієрархій, а порівняння альтернатив передбачає використання критерію "ефективність–вартість" з урахуванням вартості життєвого циклу та багаторазовості застосування. Такий підхід забезпечує комплексність оцінювання, проте потребує подальшого розвитку в частині врахування зональних відмінностей, визначення нормативних вимог до розвідувальної спроможності та обґрунтування вартості її забезпечення.

Суміжні методичні підходи розглянуто в дослідженнях [9; 10], присвячених вибору способів застосування підрозділів повітряної розвідки та оцінюванню сценарно-функціональної придатності безпілотних авіаційних комплексів для виконання спеціальних завдань. Їхні результати підтверджують доцільність урахування особливостей конкретних сценаріїв застосування під час визначення ефективності розвідувальних систем. Водночас питання формування уніфікованої системи показників, придатної для порівняння зразків у різних зонах ведення розвідки, залишається актуальним.

Важливе методологічне значення мають дослідження, присвячені класифікації безпілотних літальних апаратів та визначенню чинників їхньої ефективності. У працях [3; 4; 11] розглянуто термінологічні, класифікаційні та функціональні характеристики безпілотних систем, зокрема їх розподіл за рівнями управління, радіусом дії, злітною масою та умовами застосування. Окремий напрям становлять дослідження перспективних форм групового застосування безпілотних систем [5]. Зазначені напрацювання формують теоретичне підґрунтя для диференціації вимог до розвідувальних БпЛА, але самі по собі не визначають єдиного критерію оцінювання їхньої результативності.

Окрему групу становлять дослідження впливу засобів протидії на ефективність застосування БпЛА. І. І. Шовкошитний [12] запропонував імовірнісну модель для оцінювання ефективності системи радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами. Б. Волочій зі співавторами [13] дослідили можливості підвищення ефективності виявлення БпЛА. Ю. Є. Репіло зі співавторами [14] розглянули роль безпілотних авіаційних комплексів у розвідувально-ударній системі та вплив розвідувальної складової на її загальну бойову ефективність. Результати цих досліджень підтверджують необхідність урахування не лише

технічних можливостей літальних апаратів, а й інтенсивності протидії, імовірності збереження працездатності та здатності виконувати розвідувальні завдання протягом визначеного часу.

Теоретичну основу кількісного оцінювання якості видової інформації становлять критерії Джонсона [15], які пов’язують імовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів із просторовою роздільною здатністю зображення. Подальший розвиток цих положень відображено в метриці Targeting Task Performance (TTP) [16], орієнтованій на оцінювання результативності виконання завдань спостереження. Використання зазначених підходів дозволяє перейти від окремих характеристик оптико-електронного обладнання до кількісних оцінок придатності отриманої інформації для розв’язання розвідувальних завдань.

Математичне моделювання продуктивності огляду місцевості та виявлення об'єктів спирається на положення теорії пошуку Б. Купмана [17] і загальні моделі бойових дій [18]. Застосування цих підходів дозволяє враховувати швидкість переміщення засобу розвідки, ширину смуги огляду, ймовірність виявлення об'єктів і тривалість виконання завдання. Для оцінювання здатності літального апарата зберігати працездатність в умовах протидії можуть використовуватися положення теорії бойової живучості Р. Болла [19]. Поєднання зазначених моделей створює передумови для формалізованого оцінювання продуктивності, якості та живучості розвідувальних БпЛА.

Методичним інструментом для визначення відносної значущості показників ефективності є метод аналізу ієрархій Т. Сааті [20; 21]. Його використання дозволяє формувати вагові коефіцієнти на основі парних порівнянь і перевіряти узгодженість експертних оцінок. Водночас достовірність результатів залежить від обґрунтованості складу експертної групи, процедури отримання оцінок і перевірки їхньої узгодженості. Тому використання методу аналізу ієрархій потребує належного документування вихідних експертних даних.

Воєнно-економічний аспект оцінювання ефективності озброєння та військової техніки ґрунтується на класичних положеннях аналізу “ефективність–вартість”, розвинених Ч. Гітчем і Р. Маккіном [22], а також методах оцінювання вартості життєвого циклу [23]. Застосування цих підходів дозволяє враховувати не лише початкові витрати на придбання зразків, а й витрати на експлуатацію, технічне обслуговування, відновлення та підтримання необхідної кількості систем. Для розвідувальних БпАК особливого значення набуває співвідношення між витратами та фактично забезпеченим обсягом розвідувальних можливостей.

У зарубіжних дослідженнях [24; 25] розвиваються сценарно орієнтовані підходи, за якими ефективність безпілотних систем визначається з урахуванням конкретних завдань, умов застосування та функціональних вимог. Доктринальні положення щодо організації розвідки, спостереження та рекогносцировки, а також вимоги до своєчасності й достовірності розвідувальних відомостей розглянуто в AJP-2.7 [26]. Ці положення підтверджують доцільність оцінювання розвідувальних засобів у взаємозв'язку з потребами органів військового управління та характером інформаційного забезпечення бойових дій.

Узагальнення розглянутих досліджень свідчить, що наявні науково-методичні підходи забезпечують оцінювання окремих складових ефективності розвідувальних БпЛА, зокрема продуктивності, якості отриманої інформації, живучості та економічних витрат. Водночас їх інтеграція в єдину систему оцінювання з урахуванням відмінностей умов ведення видової повітряної розвідки на різній глибині потребує подальшого методичного опрацювання. Зокрема, недостатньо розкритими залишаються питання формування єдиного складу показників для різних зон, нормування їхніх значень відносно встановлених потреб, забезпечення незалежності індивідуальних оцінок від складу множини порівнюваних зразків, а також визначення вартості забезпечення необхідної розвідувальної спроможності.

Таким чином, дослідницька прогалина полягає в недостатній інтеграції зонально диференційованих вимог до видової повітряної розвідки, кількісних моделей розвідувальних можливостей і живучості та воєнно-економічного оцінювання в межах єдиного методу

порівняння розвідувальних БпЛА. Подолання зазначеної прогалини визначає необхідність розроблення зонального методу оцінювання, у якому склад показників залишається незмінним для всіх зон, їхні нормативні значення та вагові коефіцієнти відображають специфіку умов застосування, а економічна доцільність визначається на основі витрат на забезпечення необхідної розвідувальної спроможності.

Методологія дослідження

Методологічну основу дослідження становить системний підхід до оцінювання ефективності застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів, який передбачає комплексне врахування їхніх розвідувальних можливостей, умов виконання завдань, впливу засобів протидії та воєнно-економічних характеристик. Дослідження має теоретико-методичний характер і ґрунтується на поєднанні методів системного аналізу, декомпозиції, класифікації, математичного моделювання, багатокритеріального оцінювання та воєнно-економічного аналізу.

Системний аналіз використано для визначення взаємозв’язків між технічними характеристиками розвідувальних БпЛА, умовами їх застосування та результативністю виконання розвідувальних завдань. Метод декомпозиції застосовано для виокремлення основних складових ефективності видової повітряної розвідки та формування системи часткових показників. Методи класифікації й узагальнення використано для диференціації умов ведення розвідки залежно від глибини виконання завдань, характеру об'єктів і складу засобів протидії.

Основним методологічним положенням дослідження є зональний підхід, відповідно до якого ефективність застосування розвідувального БпЛА оцінюється не як універсальна характеристика зразка, а стосовно визначеної зони ведення видової повітряної розвідки. Такий підхід передбачає врахування просторової неоднорідності умов виконання завдань і відмінностей у вимогах до розвідувальних можливостей на тактичній, оперативній та стратегічній глибині.

Відповідно до авторської концепції простір ведення видової повітряної розвідки поділяється на шість зон, що характеризуються різною глибиною виконання завдань, складом типових об'єктів розвідки, умовами протидії та потребами органів військового управління. Межі зон розглядаються як вихідні параметри авторської моделі, що можуть уточнюватися залежно від конкретного оперативного сценарію. Такий поділ забезпечує можливість диференціації нормативних вимог до розвідувальних засобів без зміни загального складу показників ефективності.

Для оцінювання результативності застосування розвідувальних БпЛА використано систему з п'яти часткових показників, об’єднаних у три групи властивостей. Перша група характеризує продуктивність видової повітряної розвідки та охоплює продуктивність оглядового і детального режимів. Друга група відображає якість розвідувальних відомостей через достовірність ідентифікації об’єктів. Третя група характеризує здатність забезпечувати виконання розвідувальних завдань у часі та включає оперативність оновлення відомостей і живучість літального апарата.

Склад показників прийнято незмінним для всіх зон ведення розвідки. Водночас їх нормативні значення та вагові коефіцієнти диференціюються відповідно до особливостей умов застосування. Такий підхід дозволяє забезпечити єдність методичної основи оцінювання та врахувати відмінності у вимогах до розвідувальних засобів.

Для кількісного визначення часткових показників використано методи аналітичного моделювання. Просторово-часові можливості розвідувальних БпЛА оцінюються на основі положень теорії пошуку [17] з урахуванням швидкості польоту, ширини смуги огляду, тривалості перебування в зоні, часу підготовки до повторного вильоту та технічної готовності комплексу. Продуктивність оглядової розвідки характеризується площею місцевості, яку

можна обстежити за одиницю робочого часу, забезпечуючи визначену ймовірність виявлення об'єктів. Продуктивність детальної розвідки визначається кількістю об’єктів, які можуть бути обстежені та ідентифіковані протягом установленого часу.

Оцінювання якості видової інформації здійснюється з використанням критеріїв Джонсона [15] та положень метрики Targeting Task Performance [16]. У межах цього підходу враховується залежність імовірностей виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів від просторової роздільної здатності зображення, характеристик оптико-електронного обладнання та умов спостереження. Це дозволяє пов'язати технічні параметри цільового навантаження з результативністю виконання розвідувальних завдань.

Для врахування впливу засобів протидії використано положення теорії бойової живучості літальних апаратів [19] та імовірнісного моделювання. У межах авторської моделі інтенсивність втрат розглядається як функція умов протидії, висоти польоту та характеристик захищеності зразка. Вплив засобів радіоелектронної боротьби враховується через зміну ймовірності збереження працездатності та виконання завдання. Отримані оцінки використовуються для характеристики живучості розвідувального БпЛА у визначеній зоні.

Математичне моделювання ґрунтується на низці спрощувальних припущень. Зокрема, передбачається виконання оглядової розвідки за визначеною схемою польоту з установленим перекриттям смуг огляду, умовно рівномірний розподіл об’єктів розвідки в межах зони, використання типових характеристик об’єктів відповідного класу та незалежність окремих подій виявлення. Інтенсивність втрат у межах визначеного інтервалу перебування БпЛА в зоні приймається сталою, а вплив метеорологічних умов ураховується за допомогою відповідних коефіцієнтів. Зазначені припущення забезпечують можливість аналітичного опису досліджуваних процесів, проте обмежують пряме перенесення розрахункових результатів на всі можливі умови бойового застосування.

Для забезпечення порівнюваності показників застосовано нормування відносно нормативних значень, установлених для відповідної зони ведення розвідки. Нормовані значення обмежуються одиницею, що дозволяє уникнути автоматичного підвищення індивідуальної оцінки зразка внаслідок перевищення нормативних вимог за окремими характеристиками. Такий принцип нормування забезпечує незалежність значення часткового показника від складу множини порівнюваних альтернатив за умови незмінності нормативних вимог і вихідних параметрів оцінювання.

Інтегральне оцінювання ефективності здійснюється шляхом зваженого узагальнення нормованих часткових показників із додатковим урахуванням умов їх застосування. Для визначення вагових коефіцієнтів використано метод аналізу ієрархій Т. Сааті [20; 21], який передбачає парне порівняння показників за їхньою значущістю та перевірку узгодженості експертних суджень. Вагові коефіцієнти встановлюються окремо для кожної зони, що дозволяє враховувати зміну пріоритетності продуктивності, якості, оперативності та живучості залежно від характеру розвідувальних завдань.

Воєнно-економічне оцінювання ґрунтується на використанні критерію “ефективність–вартість” [22] та положень оцінювання вартості життєвого циклу озброєння і військової техніки [23]. При цьому економічні характеристики розглядаються окремо від інтегрального показника розвідувальної ефективності. Вартісною основою порівняння є витрати на забезпечення необхідної розвідувальної спроможності у визначеній зоні з урахуванням кількості необхідних систем, технічної готовності, експлуатаційних витрат, ризику втрат і потреби у відновленні парку. Такий підхід дозволяє зіставляти альтернативні зразки не лише за рівнем їхніх технічних можливостей, а й за ресурсами, необхідними для виконання встановленого обсягу розвідувальних завдань.

Дослідження організовано у чотири взаємопов’язані етапи. На першому етапі визначаються зони ведення видової повітряної розвідки, характерні умови застосування та

нормативні вимоги до розвідувальних можливостей. На другому етапі формується система показників ефективності, визначаються їхні нормативні значення та вагові коефіцієнти. На третьому етапі проводиться аналітичне оцінювання розвідувальних можливостей і живучості зразків із подальшим нормуванням та узагальненням отриманих показників. На четвертому етапі здійснюється воєнно-економічне порівняння альтернатив і формуються пропозиції щодо раціонального типорозмірного ряду розвідувальних БпАК.

Для оцінювання стійкості результатів передбачено використання аналізу чутливості, який дозволяє дослідити вплив зміни вихідних параметрів, нормативних вимог і вагових коефіцієнтів на інтегральні оцінки та результати порівняння зразків. Такий аналіз має значення для визначення меж застосовності запропонованого методу та виявлення параметрів, від яких найбільше залежить обґрунтованість управлінських рішень.

Отже, використана методологія поєднує зональну диференціацію умов ведення видової повітряної розвідки, аналітичне моделювання розвідувальних можливостей і живучості, багатокритеріальне нормування та воєнно-економічне оцінювання. Це формує методичну основу для розроблення комплексного методу порівняння розвідувальних БпЛА та обґрунтування їх раціонального вибору відповідно до встановлених потреб і ресурсних обмежень.

Результати дослідження

1. Призначення методу та вихідні положення

Метод оцінювання ефективності застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів (далі — метод М1) призначений для визначення результативності видової повітряної розвідки за допомогою розвідувальних БпАК у встановлених зонах, розрахунку кількості систем, необхідних для задоволення добових потреб у розвідувальних відомостях, воєнно-економічного порівняння альтернатив та формування раціонального типорозмірного ряду для оснащення військових частин і підрозділів.

Необхідність комплексного оцінювання зумовлена тим, що результат застосування розвідувальних засобів не можна описати однією ймовірнісною характеристикою. Його визначають обсяг розвідки (площа огляду та кількість обстежених об’єктів), якість відомостей (достовірність ідентифікації), своєчасність їх отримання та здатність підтримувати розвідку протягом установленого часу (живучість). Видова повітряна розвідка є важливою складовою розвідувально-ударного циклу, тому її результативність впливає на ефективність застосування ударних засобів [14].

Метод ґрунтується на таких вихідних положеннях:

ефективність зразка оцінюється для конкретної зони ведення розвідки, оскільки умови протидії, вимоги до відомостей і потреби органів військового управління в різних зонах відрізняються;

склад показників ефективності є інваріантним для всіх зон, а відмінності зон відображаються ваговими коефіцієнтами і нормативними (потрібними) значеннями показників;

показники нормуються відносно нормативних значень для відповідної зони з верхнім обмеженням одиницею; це зменшує вплив надлишкових характеристик і забезпечує незалежність індивідуальних нормованих оцінок від складу множини порівняння за незмінних нормативів;

вартісні характеристики не входять до інтегрального показника ефективності, а утворюють окремий вимір критерію вибору; вартісною основою критерію є вартість забезпечення потрібної розвідувальної спроможності, а не ціна виробу [22].

2. Зонування простору ведення видової повітряної розвідки

Умови ведення видової повітряної розвідки істотно відрізняються залежно від глибини виконання завдань.

На малій глибині визначальними є щільність засобів ураження малих повітряних цілей та засобів РЕБ ближньої дії, тоді як на великій глибині зростає значення ешелонованої ППО, дальності каналів управління й передавання даних, а також тривалості польоту [4; 12].

З огляду на це простір ведення розвідки умовно поділено на шість зон, межі яких співвіднесено з характером завдань відповідних ланок управління (табл. 1).

Таблиця 1. Узагальнена характеристика зон ведення видової повітряної розвідки

Зона	Глибина, км	Ланка (рівень) управління	Домінуючі засоби протидії	Типові об’єкти розвідки
Z1 – ближня тактична	0–5	відділення, взвод, рота	стрілецька зброя, зенітні установки, окопні засоби РЕБ, FPV-перехоплювачі	жива сила в бойових порядках, вогневі точки, фортифікація, загородження
Z2 – середня тактична	5–20	батальйон, бригада	ППО малої дальності, мобільні станції РЕП, засоби виявлення БпЛА	мінометні й артилерійські підрозділи, пункти управління батальйонного рівня, шляхи підвезення
Z3 – дальня тактична	20–70	бригада, корпус	ЗРК малої та середньої дальності, системні засоби РЕБ	артилерійські групи, реактивні системи, резерви, склади, пункти управління бригадного рівня
Z4 – ближня оперативна	70–120	оперативне угруповання	ЗРК середньої дальності, винищувальна авіація	оперативні резерви, вузли логістики, аеродроми підскоку, позиції ЗРК
Z5 – дальня оперативна	120–250	оперативно-стратегічний	ЗРК середньої та великої дальності, ешелонована ППО	бази постачання, залізничні вузли, пункти управління оперативного рівня
Z6 – стратегічна	понад 250	стратегічний	ешелонована ППО, засоби РЕП стратегічного рівня	об’єкти ВПК, стратегічні комунікації, аеродроми базування

Джерело: розроблено авторами.

Чинники, що впливають на ефективність розвідки, об’єднано в чотири групи:

простору і часу (глибина зони, час підльоту, робочий час, періодичність оновлення відомостей);

якості видової інформації (лінійна роздільна здатність на місцевості, поле зору, стабілізація, спектральні діапазони, прозорість атмосфери);

протидії противника (засоби радіоелектронного придушення каналів управління, передавання даних і супутникової навігації;

засоби ураження повітряних цілей різних ешелонів);

забезпечення та експлуатації (кількість підготовлених розрахунків, коефіцієнт технічної готовності, ресурс, час підготовки до повторного вильоту, інтеграція з автоматизованими системами управління (АСУ)).

Значущість чинників якісно змінюється залежно від глибини зони (табл. 2): у тактичних зонах домінують періодичність оновлення відомостей, завадозахищеність і роздільна здатність, в оперативних і стратегічних — дальність дії, тривалість польоту, продуктивність огляду та малопомітність.

Таблиця 2. Значущість основних чинників ефективності розвідки за зонами (експертні оцінки: ■■■ – вирішальний, ■■ – істотний, ■ – помірний)

Чинник	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Дальність дії лінії управління	–	■	■	■■	■■■	■■■
Тривалість польоту	■	■	■■	■■	■■■	■■■
Смуга захвату (продуктивність огляду)	■	■■	■■■	■■■	■■■	■■■
Лінійна роздільна здатність на місцевості	■■■	■■	■■	■■	■■	■■■
Періодичність оновлення відомостей	■■■	■■■	■■	■	■	■
Завадозахищеність каналів (РЕБ)	■■■	■■■	■■■	■■	■■	■■
Захищеність від засобів ураження	■■■	■■	■■	■■	■■■	■■■
Малопомітність	■	■■	■■	■■	■■■	■■■
Вартість втрати зразка	■■■	■■	■	■	■■	■■
Метеорологічні обмеження	■■	■■	■■	■	■	■

Джерело: розроблено авторами на основі [4; 7; 12].

3. Система показників ефективності видової повітряної розвідки

Система оцінювання охоплює п’ять показників, об’єднаних у три групи: результативність розвідки (продуктивність оглядового та детального режимів), якість розвідувальних відомостей (достовірність ідентифікації) і здатність підтримувати розвідку в часі (оперативність і живучість).

Показник П1 — продуктивність оглядової видової повітряної розвідки — характеризує площу місцевості, оглянуту за одиницю робочого часу із забезпеченням заданої ймовірності виявлення об’єкта (за аналогією з ефективною смугою пошуку [17]):

$$W_{\text{огл}} = V \cdot L_{\text{зах}} \cdot P_{\text{в}}, \tag{1}$$

де V – шляхова швидкість польоту, км/год;

$L_{\text{зах}}$ – смуга захвату місцевості цільовим навантаженням, км;

$P_{\text{в}}$ – ймовірність виявлення об’єкта, що потрапив у поле зору, в оглядовому режимі.

Показник П2 — продуктивність детальної видової повітряної розвідки — характеризує кількість об’єктів, ідентифікованих за одиницю робочого часу:

$$N_{\text{дет}} = \frac{60}{t_{\text{об}}} \cdot P_{\text{ід}}, \tag{2}$$

де $t_{\text{об}}$ – середній час детального обстеження одного об’єкта, хв (за досвідом застосування 2–4 хв);

$P_{\text{ід}}$ – ймовірність правильної ідентифікації об’єкта в детальному режимі.

Показник П3 — якість (достовірність) розвідувальних відомостей — визначається ймовірністю правильної ідентифікації об’єкта, що є однією з основних умов придатності відомостей для цілевказання. $P_{\text{ід}}$

Показник П4 — оперативність — характеризується періодичністю оновлення розвідувальних відомостей:

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{підг}} + T + t_{\text{обр}}, \tag{3}$$

де $t_{\text{підг}}$ – час підготовки до вильоту;

T – тривалість польоту;

$t_{\text{обр}}$ – час оброблення та доведення відомостей.

Показник П5 — живучість у зоні — характеризується ймовірністю збереження апарата та виконання завдання протягом одного вильоту з урахуванням впливу засобів ураження і РЕБ (модель наведено в підрозділі 4). $P_{\text{виж}}$

Нормування показників здійснюється відносно нормативного (потрібного) значення показника для зони з обмеженням одиницею:

$$x_{ijz}^{\text{н}} = \begin{cases} \min\left(\dfrac{x_{ijz}}{x_{jz}^{\text{потр}}};\ 1\right) & \text{для стимуляторів,} \\ \min\left(\dfrac{x_{jz}^{\text{потр}}}{x_{ijz}};\ 1\right) & \text{для дестимуляторів,} \end{cases} \tag{4}$$

де x_{ijz} – значення j-го показника i-го зразка в зоні z;
$x_{jz}^{\text{потр}}$ – нормативне значення показника для зони z.

Таке нормування має чіткий воєнний зміст: перевищення нормативної потреби зони не збільшує бойової цінності зразка, оскільки надлишкові можливості не використовуються.

Інтегральний показник ефективності зразка в зоні визначається шляхом зваженого узагальнення нормованих показників з урахуванням умов застосування:

$$E_{iz} = \sum_{j=1}^{5} w_{jz}\, x_{ijz}^{\text{н}}, \qquad E_{iz}^{\text{зб}} = E_{iz} \cdot K_{\text{мет}} \cdot K_{\text{місц}}, \qquad \sum_{j=1}^{5} w_{jz} = 1, \tag{5}$$

де w_{jz} – ваговий коефіцієнт j-го показника в зоні z;
$K_{\text{мет}}, K_{\text{місц}}$ – коефіцієнти метеорологічних умов і умов місцевості.

Вплив РЕБ на виконання завдання враховано в показнику живучості через коефіцієнт $K_{\text{реб}}$, тому окремо в (5) він не вводиться, що виключає подвійний облік.

Вагові коефіцієнти визначаються методом аналізу ієрархій [20; 21] як нормований власний вектор матриці парних порівнянь A з контролем узгодженості експертних суджень:

$$A\,w = \lambda_{\max}\,w, \qquad CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \qquad CR = \frac{CI}{RI} \le 0{,}10, \tag{6}$$

де $\lambda_{\max}$ – максимальне власне число матриці;
n – порядок матриці;
CI, RI – індекс узгодженості та випадковий індекс;
CR – відношення узгодженості.

Вагові коефіцієнти та нормативні значення показників для кожної зони наведено в табл. 3 і 4.

Таблиця 3. Вагові коефіцієнти показників ефективності за зонами розвідки (CR ≤ 0,10)

Показник	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
П1 – продуктивність оглядової розвідки	0,20	0,22	0,25	0,26	0,28	0,30
П2 – продуктивність детальної розвідки	0,20	0,20	0,20	0,19	0,18	0,17
П3 – якість (достовірність) ідентифікації	0,15	0,16	0,18	0,20	0,22	0,23
П4 – оперативність (періодичність)	0,25	0,22	0,17	0,14	0,10	0,08
П5 – живучість у зоні	0,20	0,20	0,20	0,21	0,22	0,22
Разом	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**

Джерело: розроблено авторами.

Зміна вагових коефіцієнтів із глибиною зони відображає зміну пріоритетів: вага

оперативності зменшується від 0,25 у ближній тактичній зоні до 0,08 у стратегічній (об'єкти глибини менш мобільні), а вага продуктивності огляду і якості ідентифікації зростає (площі районів розвідки збільшуються, а помилка ідентифікації призводить до нераціонального витрачання дорогих засобів ураження великої дальності).

Таблиця 4. Нормативні (потрібні) значення показників та добові потреби зон розвідки

Зона	$W_{огл}$, км²/год	$N_{дет}$, об./год	$P_{ід}$	$T_ц$, год	$P_{виж}$	$S_{доба}$, км²	$O_{доба}$, об'єктів
Z1 – ближня тактична	15	12	0,80	1,5	0,70	300	60
Z2 – середня тактична	40	12	0,80	2,5	0,70	900	90
Z3 – дальня тактична	90	12	0,80	4,0	0,70	3000	120
Z4 – ближня оперативна	150	10	0,80	6,0	0,70	3000	100
Z5 – дальня оперативна	220	10	0,75	10,0	0,70	7800	90
Z6 – стратегічна	300	8	0,75	14,0	0,70	12000	60

Примітка. *Нормативні значення відповідають типовій смузі відповідальності оперативного угруповання шириною близько 60 км і підлягають затвердженню замовником для конкретного оперативного сценарію.*

Джерело: розроблено авторами.

4. Математичні моделі видової повітряної розвідки в зоні

Математична модель видової повітряної розвідки має блокову структуру та охоплює три взаємопов'язані складові: просторово-часові можливості, якість видової інформації, а також протидію та живучість.

Прийнято такі припущення: політ у зоні здійснюється паралельними галсами із заданим перекриттям смуг огляду; об'єкти розвідки умовно рівномірно розподілені в межах зони, а їх критичний розмір є типовим для відповідного класу; події виявлення об'єктів в оглядовому режимі вважаються незалежними; інтенсивність втрат протягом перебування апарата в зоні приймається сталою; вплив метеорологічних умов враховується інтегральним коефіцієнтом придатного для польотів часу.

Модель просторово-часових можливостей. Час підльоту до зони і повернення та робочий час у зоні:

$$t_{\text{підл}} = \frac{2D_z}{V}, \qquad t_{\text{роб}} = k\,T - t_{\text{підл}}, \tag{7}$$

де D_z – середня глибина зони z, км;

k – коефіцієнт використання тривалості польоту з урахуванням аеронавігаційного запасу (прийнято $k = 0{,}9$).

Смуга захвату місцевості в оглядовому режимі:

$$L_{\text{зах}} = 2H\,\text{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right) k_{\text{пер}} \cdot 10^{-3}, \tag{8}$$

де H – робоча висота, м;

β – кут поля зору в оглядовому режимі;

$k_{\text{пер}}$ – коефіцієнт перекриття суміжних галсів (0,8–0,9).

Кількість вильотів системи за добу:

$$n_{\text{в}} = \min\left(n_{\text{в}}^{\max};\ \frac{T_{\text{роб.доба}}}{T_{\text{ц}}}\right), \tag{9}$$

де $n_{\text{в}}^{\max}$ – обмеження за ресурсом розрахунку (прийнято 4 вильоти);
$T_{\text{роб.доба}}$ – тривалість роботи розрахунку за добу (прийнято 16 год).

Добові можливості однієї системи за площею оглядової розвідки та за кількістю детально обстежених об'єктів:

$$S_{\text{сист}} = n_{\text{в}}\, k_{\text{огл}}\, t_{\text{роб}}\, W_{\text{огл}}\, k_{\text{тг}}, \qquad O_{\text{сист}} = n_{\text{в}}(1 - k_{\text{огл}}) t_{\text{роб}}\, N_{\text{дет}}\, k_{\text{тг}}, \tag{10}$$

де $k_{\text{огл}}$ – частка робочого часу, що відводиться на оглядову розвідку (прийнято 0,7);
$k_{\text{тг}}$ – коефіцієнт технічної готовності (прийнято 0,85).

Модель якості видової інформації. Лінійна роздільна здатність на місцевості:

$$GSD = \frac{q\, H}{1000}, \qquad q = \frac{p_{\text{пкс}}}{f} \cdot 10^3, \tag{11}$$

де q – кутова роздільна здатність, мрад на піксель;
$p_{\text{пкс}}$ – розмір елемента матриці, мм;
f – фокусна відстань об'єктива, мм.

Кількість пар ліній на критичному розмірі об'єкта $N = a/(2\, GSD)$, де a – критичний розмір об'єкта (для легкобронькованої та автомобільної техніки, вогневих засобів прийнято $a = 2{,}3$ м).

Ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації обчислюються за критеріями Джонсона [15; 16] у вигляді функції цільового перетворення:

$$P(N;\, N_{50}) = \frac{(N/N_{50})^E}{1 + (N/N_{50})^E}, \qquad E = 2{,}7 + 0{,}7\, \frac{N}{N_{50}}, \tag{12}$$

де N_{50} – кількість пар ліній, за якої задача розв'язується з імовірністю 0,5.

З різними значеннями роздільної здатності для оглядового і детального режимів:

$$P_{\text{в}} = P\left(\frac{a}{2\, GSD_{\text{огл}}};\, 1{,}0\right), \quad P_{\text{р}} = P\left(\frac{a}{2\, GSD_{\text{дет}}};\, 4{,}0\right), \quad P_{\text{ід}} = P\left(\frac{a}{2\, GSD_{\text{дет}}};\, 6{,}4\right). \tag{13}$$

Залежності ймовірностей виявлення, розпізнавання та ідентифікації від кількості пар ліній наведено на рис. 1.

Для висот понад 4000 м у розрахунках додатково враховується ослаблення контрасту в атмосфері:

$$N^{\Phi} = N \exp\left(-\frac{k_{\text{атм}}\, H}{1000}\right), \tag{14}$$

де $k_{\text{атм}}$ = 0,03–0,08 на кілометр висоти.

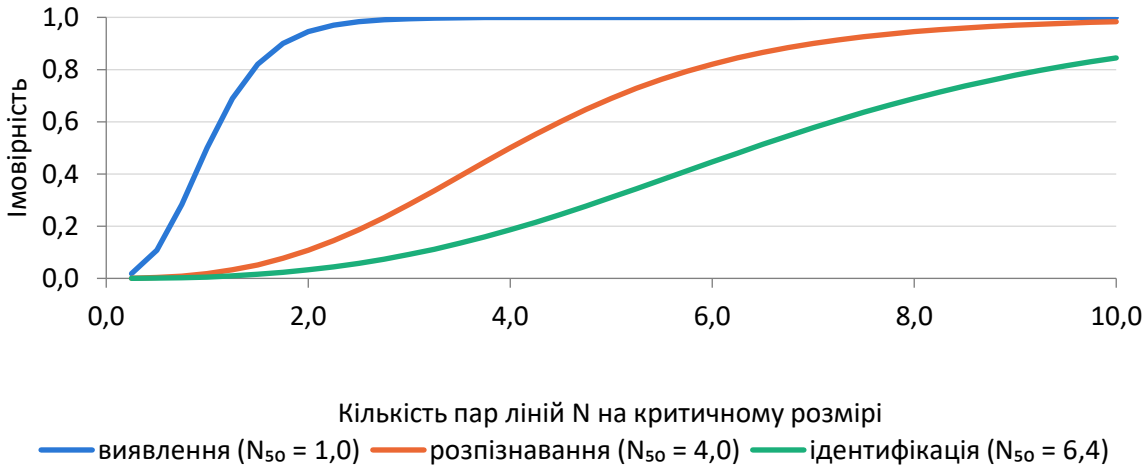


Рисунок 1. Залежність імовірностей виявлення, розпізнавання та ідентифікації від кількості пар ліній на критичному розмірі об'єкта

Джерело: розраховано авторами за (12).

Модель протидії та живучості. Інтенсивність втрат апарата в зоні визначається сумою двох складових – від засобів ураження малих висот, дія яких зменшується з висотою, і від зенітних ракетних комплексів (ЗРК) середньої та великої дальності, дія яких зростає з висотою [19]:

$$\lambda(H; z) = \left(a_z\, e^{-H/H_0} + b_z\left(1 - e^{-H/H_1}\right)\right)\left(1 - 0{,}5\, x_{\text{скр}}\right), \tag{15}$$

де a_z, b_z – параметри інтенсивності протидії в зоні z для малих і великих висот, 1/год; $H_0 = 1200$ м, $H_1 = 2500$ м – характерні висоти; $x_{\text{скр}}$ – нормована оцінка малопомітності зразка. З умови $\partial\lambda/\,\partial H = 0$ отримано аналітичний вираз для висоти мінімальних втрат у зоні:

$$H_z^* = \frac{\ln\left(\frac{a_z H_1}{b_z H_0}\right)}{1/H_0 - 1/H_1}, \tag{16}$$

яка не залежить від малопомітності зразка, оскільки множник $\left(1 - 0{,}5\, x_{\text{скр}}\right)$ змінює лише рівень втрат, але не положення мінімуму. Ймовірність виживання за виліт з урахуванням впливу РЕБ:

$$P_{\text{виж}} = e^{-\lambda\, k_{\text{екс}}\, t_{\text{роб}}} \cdot K_{\text{реб}}, \qquad K_{\text{реб}} = K_{0z} + (1 - K_{0z}) x_{\text{реб}}, \tag{17}$$

де $k_{\text{екс}}$ – коефіцієнт експозиції (частка робочого часу в зоні дії засобів ураження, прийнято 0,6);

K_{0z} – мінімальний рівень збереження працездатності за повної незахищеності зразка в зоні z;

$x_{\text{реб}}$ – нормована оцінка завадозахищеності комплексу.

Залежність інтенсивності втрат від висоти для шести зон наведено на рис. 2.

Потрібна кількість систем для покриття добової потреби зони з урахуванням відновлення втрат:

$$N_{iz} = \max\left(\frac{S_{\text{доба}}}{S_{\text{сист}}};\ \frac{O_{\text{доба}}}{O_{\text{сист}}}\right) \cdot k_{\text{в}}, \qquad k_{\text{в}} = 1 + 2(1 - P_{\text{виж}}), \tag{18}$$

де $k_{\text{в}}$ – коефіцієнт відновлення втрат, що враховує потребу утримання резерву та поповнення парку.

Умова досяжності зони за радіовидимістю для зразків, що працюють на великих глибинах:

$$D_{\text{рв}} \approx 4{,}12\left(\sqrt{h_{\text{а}}} + \sqrt{H}\right) \geq D_z^{\max}, \tag{19}$$

де $D_{\text{рв}}$ – дальність прямої радіовидимості, км;

$h_{\text{а}}$ – висота антени наземної станції, м.

За висоти антени 10 м і робочої висоти 1500 м дальність радіовидимості становить близько 173 км, за висоти 500 м – близько 105 км; тому для малих зразків, що працюють на висотах 300–600 м, фактична дальність управління обмежується 80–110 км незалежно від енергетики радіолінії.

Параметри моделі для кожної зони та висоти мінімальних втрат, розраховані за формулою (16), наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Параметри математичних моделей розвідки за зонами

Зона	D_z, км	D_z^{max}, км	a_z, 1/год	b_z, 1/год	K_{0z}	$K_{місц}$	H_z^*, км
Z1	3	5	0,45	0,005	0,55	0,95	12,1
Z2	12	20	0,32	0,010	0,60	0,95	9,7
Z3	45	70	0,20	0,020	0,65	0,96	7,0
Z4	95	120	0,12	0,030	0,72	0,97	4,9
Z5	185	250	0,08	0,040	0,78	0,97	3,3
Z6	400	450	0,05	0,050	0,85	0,97	1,7

Джерело: розроблено авторами; значення H_z^* розраховано за (16).

Аналіз отриманих залежностей дає змогу зробити кілька практично значущих висновків. По-перше, залежність інтенсивності втрат від висоти має мінімум, положення якого зміщується зі збільшенням глибини зони: у ближній і середній тактичних зонах інтенсивність втрат монотонно зменшується в усьому практичному діапазоні висот (мінімум лежить вище 9 км), у дальній тактичній зоні мінімум досягається на висоті близько 7,0 км, у ближній оперативній – близько 4,9 км, у дальній оперативній – близько 3,3 км, у стратегічній – близько 1,7 км (табл. 5, рис. 2). Отже, для середньовисотних платформ в оперативних і стратегічній зонах подальше підвищення висоти понад оптимальну призводить до зростання втрат, і зменшення часу перебування в зоні дії засобів ППО є ефективнішим засобом підвищення живучості, ніж підвищення висоти.

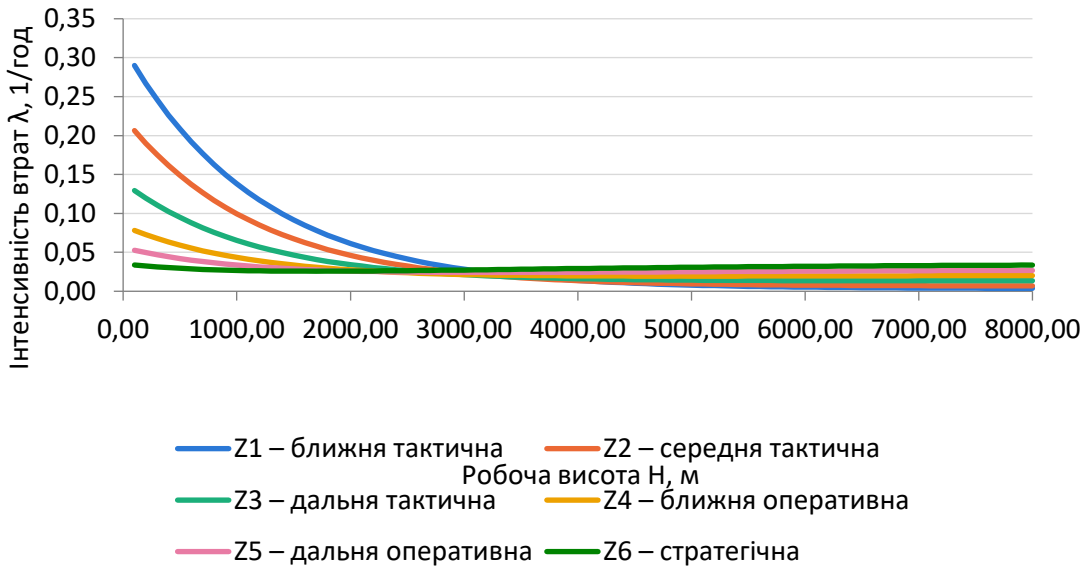


Рисунок 2. Залежність інтенсивності втрат БпЛА від робочої висоти польоту для зон ведення розвідки ($x_{\text{скр}} = 0{,}6$)

Джерело: розраховано авторами за (15) і даними табл. 5.

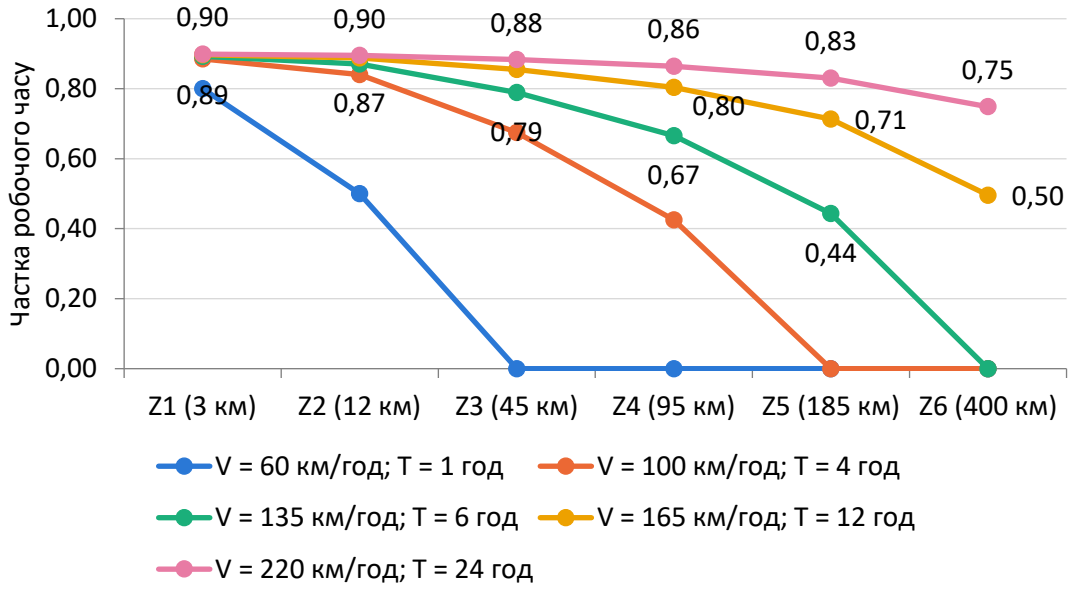


Рисунок 3. Частка робочого часу в зоні у загальній тривалості польоту залежно від середньої глибини зони

Джерело: розраховано авторами за (7).

По-друге, частка робочого часу в загальній тривалості польоту різко зменшується з глибиною зони: зразки з тривалістю польоту близько 1 год у середній тактичній зоні використовують для розвідки лише половину часу польоту і практично втрачають придатність у дальній тактичній зоні, а зразки з тривалістю польоту 4 год – у дальній оперативній зоні (рис. 3).

По-третє, для зразка з фіксованим цільовим навантаженням підвищення робочої висоти збільшує продуктивність оглядового режиму майже лінійно, але знижує ймовірність виявлення, тому оптимум визначається компромісом між продуктивністю, якістю і живучістю (рис. 4, 5).

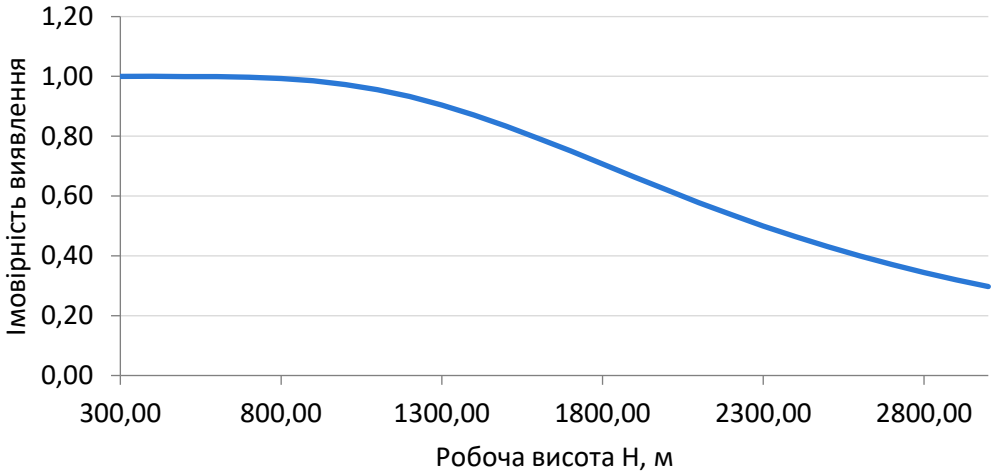


Рисунок 4. Вплив робочої висоти на ймовірність виявлення в оглядовому режимі (умовний зразок БпАК-05, $q = 0{,}5$ мрад)

Джерело: розраховано авторами за (11)–(13).

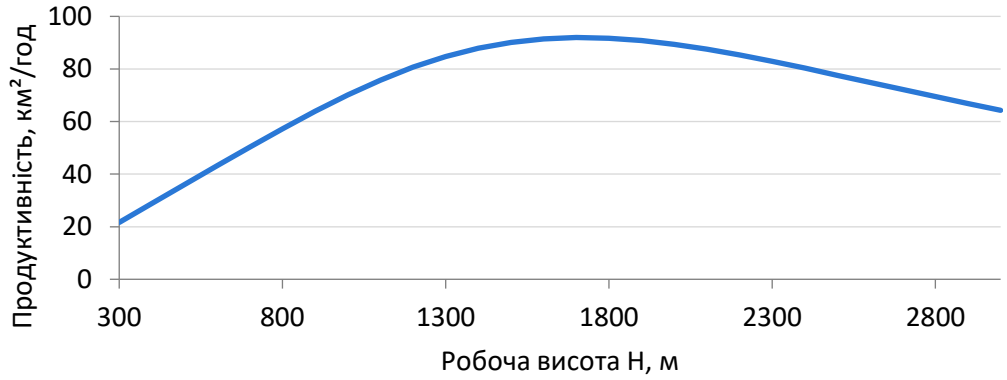


Рисунок 5. Вплив робочої висоти на продуктивність оглядової розвідки (умовний зразок БпАК-05)

Джерело: розраховано авторами за (1), (8), (13).

5. Воєнно-економічна складова методу

Вартість життєвого циклу зразка визначається за співвідношенням [8; 23]:

$$C_{\text{жц}} = C_{\text{з}} + \frac{N_{\text{п}}\, t_{\text{с}}\, C_{\text{г}}}{1000} + C_{\text{н}} + C_{\text{то}}\, T_{\text{сл}}, \qquad (20)$$

де $C_{\text{з}}$ – закупівельна ціна системи, тис. дол.;

$N_{\text{п}}$ – призначений ресурс, польотів;

$t_{\text{с}}$ – середня тривалість польоту (прийнято $0{,}8\,T$);

$C_{\text{г}}$ – вартість льотної години, дол./год;

$C_{\text{н}}$ – витрати на підготовку розрахунків;
$C_{\text{то}}$ – річні витрати на технічне обслуговування;
$T_{\text{сл}}$ – строк експлуатації.

Принциповою особливістю методу є вибір вартісної основи критерію відповідно до постановки завдання.

Варіант А (зональний). Для формування типорозмірного ряду за зонами вартісною основою є витрати на оснащення, необхідне для покриття добової потреби відповідної зони:

$$C_{iz} = N_{iz} \cdot C_{\text{жц}\,i}, \qquad C_{iz}^{\text{н}} = \frac{C_{iz}}{C_z^{\min}}, \qquad C_z^{\min} = \min_{i \in A_z^{\text{доп}}} C_{iz}, \tag{21}$$

Критерій "ефективність–вартість" для зони визначається так:

$$K_{\text{ев}\,iz} = \frac{E_{iz}^{\text{зб}}}{C_{iz}^{\text{н}}} \to \max. \tag{22}$$

Економічний зміст такого вибору полягає в тому, що замовника цікавить не ціна окремого виробу, а вартість забезпечення потрібної розвідувальної спроможності: зразок з удвічі нижчою ціною, але вчетверо меншою продуктивністю, потребує вчетверо більшого парку й є економічно гіршим.

Коефіцієнт відновлення втрат у формулі (18) також враховує потребу в поповненні парку зразків із нижчою живучістю.

Варіант Б (для ланки управління). Для задачі вибору зразка для оснащення конкретної ланки управління (роти, батальйону, бригади) застосовується спрощена модель ефективності з дев'ятьма показниками у трьох групах властивостей [8]: розвідувальні можливості (x_1 – продуктивність виявлення цілей, цілей/год; x_2 – імовірність ідентифікації; x_3 – глибина розвідки, км; x_4 – тривалість польоту, год), живучість (x_5 – захищеність від РЕБ; x_6 – захищеність від ураження) та експлуатаційні властивості (x_7 – напрацювання на відмову, год; x_8 – ресурс застосувань, польотів; x_9 – строк експлуатації, років). Показники нормуються відносно найкращого значення серед зразків, що порівнюються, і згортаються в групові та інтегральні показники:

$$x_{ij}^{\text{н}} = \frac{x_{ij}}{\max\limits_i x_{ij}}, \qquad E_{ki} = \sum_{j \in J_k} w_j \, x_{ij}^{\text{н}}, \qquad E_i = \sum_{k=1}^{3} W_k \, E_{ki}, \tag{23}$$

де J_k – множина показників k-ї групи;
w_j – вагові коефіцієнти показників у межах групи;
W_k – вагові коефіцієнти груп.

Приведений інтегральний показник:

$$E_i^{\text{зб}} = E_i \cdot K_{\text{реб}} \cdot K_{\text{мет}} \cdot K_{\text{місц}}, \qquad K_{\text{реб}} = K_0 + (1 - K_0) x_{i5}^{\text{н}}, \tag{24}$$

де K_0 – мінімальний рівень збереження ефективності за повної незахищеності в умовах прогнозованої інтенсивності радіоелектронного придушення (0,85 – епізодична протидія; 0,70 – помірна інтенсивність; 0,50 – висока інтенсивність).

Вартісною основою критерію є питома вартість години розвідувальної роботи, що враховує багаторазовість і тривалість застосування:

$$C_{\text{пит}\,i} = \frac{1000\, C_{\text{жц}\,i}}{N_{\text{п}\,i}\, t_{\text{с}\,i}}, \qquad C_i^{\text{н}} = \frac{C_{\text{пит}\,i}}{\min\limits_{l \in A_{\text{доп}}} C_{\text{пит}\,l}}, \qquad K_{\text{ев}\,i} = \frac{E_i^{\text{зб}}}{C_i^{\text{н}}} \to \max. \tag{25}$$

Набори вагових коефіцієнтів W_k, w_j і мінімальна потрібна глибина розвідки диференціюються за ланками управління: для ротної ланки підвищується вага простоти експлуатації та вартості, для батальйонної – завадостійкості й оперативності, для бригадної – глибини розвідки, якості ідентифікації та інтегрованості в АСУ.

Для оцінювання внеску кожного показника в інтегральну оцінку і визначення напрямів удосконалення зразка використовуються коефіцієнти еластичності:

$$\eta_{ij} = \frac{\partial E_i}{\partial x_{ij}^{\text{н}}} \cdot \frac{x_{ij}^{\text{н}}}{E_i} = \frac{W_{k(j)}\, w_j\, x_{ij}^{\text{н}}}{E_i}. \quad (26)$$

6. Процедура прийняття рішення та алгоритм методу

Метод передбачає чотириетапну процедуру з трьома умовами прийняття рішення та двома контурами зворотного зв'язку (рис. 6).

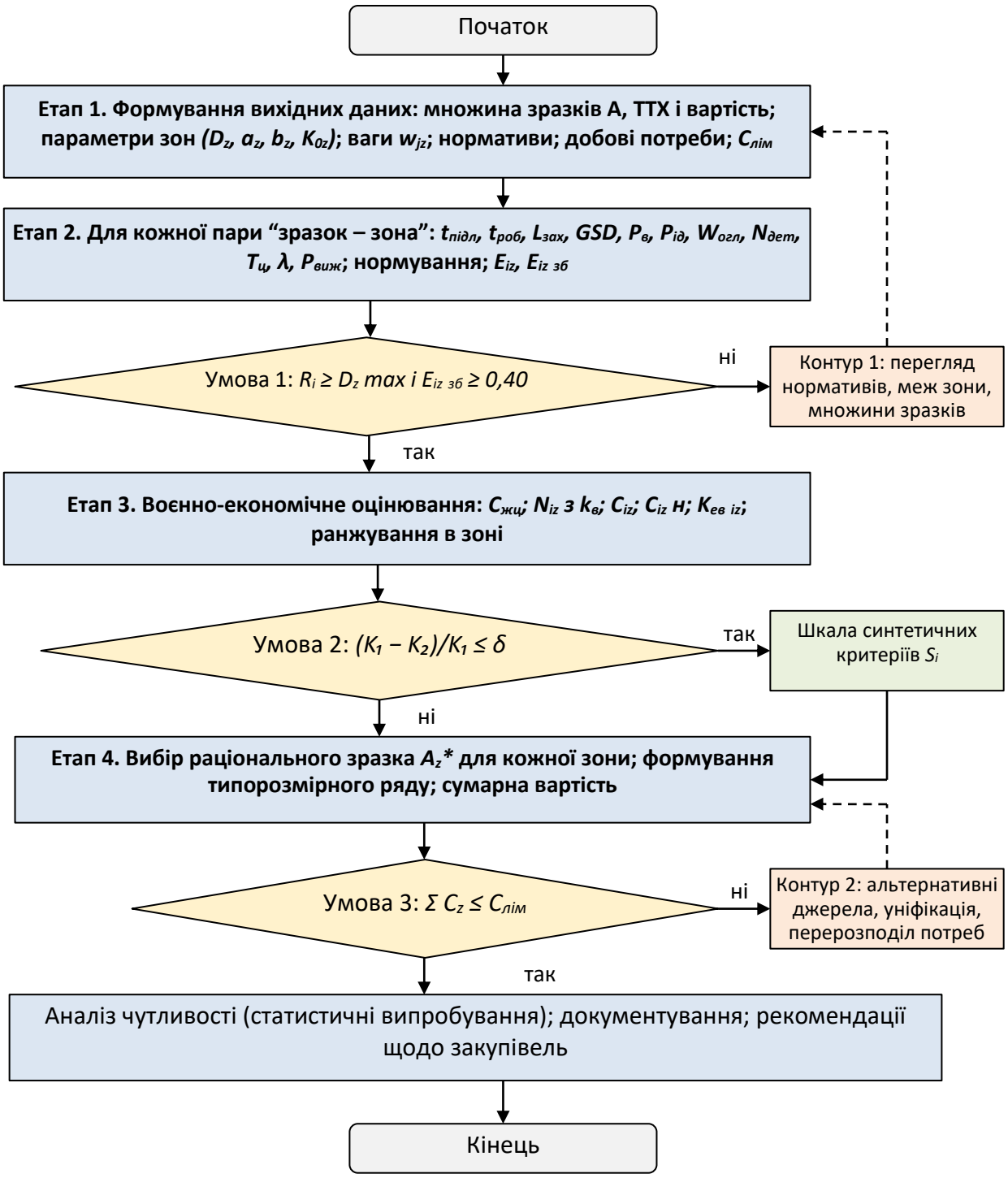


Рисунок 6. Алгоритм методу оцінювання ефективності застосування розвідувальних БпЛА (метод М1)

Джерело: розроблено авторами.

Умова 1 — допуск зразка до порівняння в зоні за критеріями досяжності та порогового рівня ефективності:

$$A_z^{\text{доп}} = \left\{ i:\ R_i \geq D_z^{\max} \ \wedge\ E_{iz}^{\text{зб}} \geq E_{\text{доп}} \right\}, \qquad E_{\text{доп}} = 0{,}40, \tag{27}$$

де R_i – гарантована дальність управління i-м зразком з урахуванням умови (19).

Умова 2 — перевірка практичної нерозрізненності двох найкращих альтернатив у зоні:

$$\frac{K_{(1)} - K_{(2)}}{K_{(1)}} \leq \delta, \qquad \delta = 0{,}05, \tag{28}$$

де $K_{(1)}, K_{(2)}$ – найбільше та друге за величиною значення критерію (22) у зоні.

У разі виконання умови (28) різниця між лідерами вважається меншою за похибку вихідних даних, і рішення приймається за шкалою синтетичних критеріїв S_i, що враховує додаткові чинники: уніфікацію з наявним парком, рівень локалізації виробництва та захищеність ланцюгів постачання, строки поставок, зрілість зразка.

Умова 3 — перевірка відповідності сумарної вартості оснащення за раціональним типорозмірним рядом установленому фінансовому ліміту:

$$A_z^* = \arg\max_{i \in A_z^{\text{доп}}} K_{\text{ев}\,iz}, \quad z = 1, \ldots, 6; \qquad \sum_{z=1}^{6} C_{A_z^* z} \leq C_{\text{лім}}. \tag{29}$$

Перший контур зворотного зв’язку застосовується, якщо жоден зразок не відповідає умовам допуску до порівняння в зоні. У такому разі передбачено перегляд нормативних вимог за належного обґрунтування, уточнення меж зони або розширення множини альтернатив.

Контур 2 спрацьовує в разі перевищення фінансового ліміту і передбачає послідовне застосування трьох заходів: заміну зразка стратегічної зони альтернативним джерелом видової інформації (космічні системи спостереження); уніфікацію типів між суміжними зонами з допустимою втратою значення критерію; перерозподіл добових потреб між зонами з коригуванням нормативних вимог.

Завершальним кроком є аналіз чутливості: вихідні дані, що визначаються експертно (параметри протидії a_z, b_z, K_{0z}, вагові коефіцієнти, нормативні значення), варіюються методом статистичних випробувань у межах їх невизначеності, а стійкість рішення оцінюється частотою збереження зразком першого рангу в зоні.

Вихідними результатами методу є: значення показників ефективності кожного зразка в кожній зоні; множини допущених зразків і ранжовані переліки зразків за критерієм “ефективність–вартість”; раціональний типорозмірний ряд з потрібною кількістю систем і вартістю оснащення; оцінки стійкості рішень до варіацій вихідних даних.

Обговорення

Для визначення місця запропонованого методу серед наявних підходів проведено їх якісне порівняння (табл. 6). Це порівняння характеризує методичні особливості, але не доводить переваги методу М1 за точністю прогнозування або результативністю практичного застосування.

Порівняно з розглянутими підходами метод М1 передбачає такі потенційні переваги:

оцінювання прив’язане до зони і враховує якісну відмінність умов протидії та вимог до відомостей; показники мають фізичний зміст і обчислюються з тактико-технічних характеристик (ТТХ) за аналітичними моделями, що дає змогу оцінювати зразки, які ще не застосовувалися в бойових умовах;

нормування відносно нормативних значень забезпечує незалежність індивідуальних оцінок від складу множини альтернатив за незмінних нормативів;

вартісна основа критерію відображає витрати на забезпечення розвідувальної спроможності з урахуванням продуктивності, живучості та відновлення втрат;

передбачено формалізовані процедури прийняття рішень за близьких оцінок альтернатив і в разі перевищення фінансового ліміту.

До обмежень методу належать: агрегований характер моделі протидії, параметри якої (a_z, b_z, K_{0z}) визначаються експертно і потребують калібрування за статистикою втрат; припущення про рівномірний розподіл об'єктів у зоні; врахування метеорологічних умов інтегральним коефіцієнтом. Ці обмеження компенсуються аналізом чутливості результатів і процедурою уточнення параметрів на основі даних об'єктивного контролю.

Таблиця 6. Порівняння методу М1 з наявними підходами до оцінювання БпАК

Підхід (джерело)	Сутність підходу	Обмеження стосовно задачі дослідження
Вибір раціонального типу і варіанта обладнання БпЛА [6]	багатокритеріальний вибір на основі методу аналізу ієрархій і медіани Кемені для зменшення суб'єктивності експертних оцінок	не визначає потрібну кількість систем і вартість забезпечення розвідувальної спроможності
Оцінка параметрів БпАК військового призначення [7]	SWOT-аналіз і зіставлення ТТХ з даними бойового застосування; орієнтовні вимоги до БпАК артилерійської розвідки	переважно якісний характер оцінок, відсутність інтегрального критерію вибору
Воєнно-економічне оцінювання розвідувальних БпАС [8]	дев'ять показників у трьох групах, ваги за методом аналізу ієрархій, сценарне приведення з урахуванням РЕБ, критерій "ефективність–вартість" на основі вартості життєвого циклу	нормування відносно найкращого зразка множини порівняння; оцінювання для ланки управління без зонального поділу простору розвідки (використано в методі М1 як варіант Б)
Вибір способу застосування підрозділу повітряної розвідки [9]	формалізована багатокритеріальна процедура з урахуванням обстановки, ТТХ БпАС і ресурсних обмежень	спрямований на вибір способу застосування, а не зразка ОВТ
Оцінювання ефективності системи РЕБ з БпЛА [12]	імовірнісна модель виявлення і придушення БпЛА з переведенням оцінок у шкалу бажаності	описує протидію БпЛА; результати придатні для калібрування параметрів K_{0z} методу М1
Метод М1 (запропонований)	зональне оцінювання п'яти показників з нормуванням до нормативних потреб зони; аналітичні моделі розвідки і живучості; критерій "ефективність–вартість забезпечення спроможності"; типорозмірний ряд	параметри моделі протидії визначаються експертно і потребують калібрування за статистикою втрат

Джерело: розроблено авторами на основі [6–9; 12].

Зональне нормування відносно заздалегідь визначених потреб забезпечує сталість індивідуальної оцінки зразка за незмінних нормативів. Водночас воно не гарантує незмінності остаточного рангу за зміни складу альтернатив, особливо за наявності додаткових критеріїв вибору та бюджетних обмежень. Отже, твердження про незалежність оцінок слід обмежувати саме нормованими показниками й інтегральними значеннями за фіксованих параметрів.

Окремого узгодження потребують два варіанти воєнно-економічного оцінювання. Зональний варіант А використовує нормативне нормування та вартість забезпечення

необхідної спроможності, тоді як варіант Б відтворює іншу систему показників і принцип порівняння. Їхні результати не можна вважати безпосередньо еквівалентними без спеціальної процедури приведення. Доцільно розглядати варіант Б як допоміжний інструмент для окремого управлінського завдання.

Розрахункові висоти мінімальних втрат характеризують екстремум прийнятої аналітичної функції, а не універсально рекомендовані висоти польоту. Фізична реалізовність результату залежить від льотних обмежень конкретного зразка, якості отримуваного зображення та інших умов. Тому висновки щодо практичного вибору висоти потребують додаткових обмежень і перевірки на незалежних даних.

Вихідні ваги, нормативні значення та параметри протидії мають бути задокументовані як емпіричні оцінки або сценарні припущення. Сам факт наведення числових значень не підтверджує їхню статистичну достовірність. Для подальшої перевірки методу необхідно навести матриці парних порівнянь, фактичні значення CR, інтервали невизначеності параметрів та демонстраційний розрахунок для кількох альтернатив.

Порівняння з відомими підходами свідчить про можливості комплексного застосування запропонованого інструментарію, однак без зовнішньої валідації не дозволяє стверджувати, що він забезпечує кращі рішення за всіх сценаріїв. Подальше дослідження доцільно спрямувати на перевірку відтворюваності результатів і чутливості вибору до вихідних припущень.

Висновки

У статті запропоновано метод оцінювання ефективності застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів, який, на відміну від наявних, ґрунтується на зональному підході: простір ведення видової повітряної розвідки поділено на шість зон глибиною від 0–5 км до понад 250 км, для кожної з яких визначено домінуючі засоби протидії, вагові коефіцієнти та нормативні значення показників ефективності.

Сформовано інваріантну систему з п’яти показників (продуктивність оглядової і детальної розвідки, достовірність ідентифікації, оперативність, живучість у зоні), що обчислюються з ТТХ зразків за аналітичними моделями просторово-часових можливостей, якості видової інформації (на основі критеріїв Джонсона) та протидії і живучості. Нормування показників відносно нормативних потреб зони з обмеженням одиницею усуває перекіс оцінок на користь надлишкових платформ і робить результат незалежним від складу множини порівняння.

Отримано аналітичний вираз для висоти мінімальних втрат у зоні, який показує, що оптимальна робоча висота знижується від понад 9 км у тактичних зонах до близько 1,7 км у стратегічній зоні; для середньовисотних платформ на оперативній глибині скорочення часу перебування в зоні дії ППО є ефективнішим засобом підвищення живучості, ніж набір висоти. Показано, що дальність прямої радіовидимості обмежує застосування малих зразків глибиною 80–110 км незалежно від енергетики радіолінії.

Воєнно-економічну складову методу побудовано так, що вартісною основою критерію “ефективність–вартість” є вартість забезпечення потрібної розвідувальної спроможності зони (з урахуванням потрібної кількості систем і відновлення втрат) або питома вартість години розвідувальної роботи для ланки управління. Формалізовано чотириетапну процедуру прийняття рішення з трьома умовами та двома контурами зворотного зв’язку, що охоплює ситуації нерозрізнення лідерів і перевищення фінансового ліміту.

Практичне значення методу полягає в можливості його використання органами військового управління та науковими установами під час обґрунтування закупівель розвідувальних БпАК, формування раціонального типорозмірного ряду для оснащення частин (підрозділів) і визначення напрямів удосконалення зразків на основі коефіцієнтів еластичності.

Подальші дослідження доцільно зосередити на калібруванні параметрів моделі протидії за статистикою бойових втрат, урахуванні нерівномірного розподілу об’єктів розвідки, поширенні методу на групове (зокрема ройове) застосування розвідувальних БпЛА та інтеграції методу в систему підтримки прийняття рішень щодо оборонних закупівель.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел:

1. Watling J., Reynolds N. Meatgrinder: Russian tactics in the second year of its invasion of Ukraine : RUSI Special Report. London : Royal United Services Institute, 2023. URL: https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/special-resources/meatgrinder-russian-tactics-second-year-its-invasion-ukraine (дата звернення: 25.08.2026).
2. Kunertova D. The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game. Bulletin of the Atomic Scientists. 2023. Vol. 79, No. 2. P. 95–102. DOI: https://doi.org/10.1080/00963402.2023.2178180.
3. Семененко О., Водчиць О., Дзюбчук Р., Тарасов О., Ярмольчик М., Столінець С. Термінологічні аспекти розвитку безпілотних систем військового призначення: український та закордонний досвід. Military Science. 2025. Т. 3, № 3. С. 47–65. DOI: https://doi.org/10.62524/msj.2025.3.3.4.
4. Мельниченко А. Аналіз та оцінювання факторів, які впливають на ефективність застосування безпілотних систем в операціях (бойових діях). Military Science. 2025. Т. 3, № 2. С. 210–225. DOI: https://doi.org/10.62524/msj.2025.3.2.16.
5. Семененко О., Островський С., Мовчан А., Мельниченко А., Столінець С., Петренко С. Роль і місце роїв безпілотних систем в операціях (бойових діях) та варіанти їх застосування. Social Development and Security. 2024. Т. 14, № 5. С. 75–86. DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.7.
6. Єфремов О. В., Коршець О. А. Методика вибору раціонального типу і варіанта обладнання безпілотних літальних апаратів для виконання завдань. Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. Вип. 5(51). С. 3–7. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.003.
7. Кравець Т., Полець О., Анікольчук О. Оцінка параметрів безпілотних авіаційних комплексів військового призначення. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2023. Вип. II(46). С. 55–62. URL: https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/61358 (дата звернення: 25.08.2026).
8. Коваль В., Добровольський Ю., Ремез А., Дзюбчук Р., Загородній В., Ротте С. Метод воєнно-економічного оцінювання розвідувальних безпілотних авіаційних систем для вибору раціонального зразка. Social Development and Security. 2026. Т. 16, № 4. С. 420–439. DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.25.
9. Катеринчук І., Черноусов Д. Удосконалений метод вибору способу застосування підрозділу повітряної розвідки. Social Development and Security. 2026. Т. 16, № 4. С. 161–173. DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.8.
10. Бачинський А. Оцінювання сценарно-функціональної придатності безпілотних авіаційних систем до виконання завдань виявлення хімічного та радіоактивного зараження. Social Development and Security. 2026. Т. 16, № 3. С. 256–270. DOI:

https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.3.17.
11. Іванченко О. В., Курдюк С. В., Хатунцев Ю. Ю., Рудніченко С. В. Аналіз можливостей застосування та класифікація безпілотних літальних апаратів для забезпечення бойових дій Військово-Морських Сил Збройних Сил України. Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОВТ. 2023. № 4(18). С. 23–33. DOI: https://doi.org/10.37701/dndivsovt.18.2023.04.
12. Шовкошитний І. І. Математична модель оцінювання ефективності системи радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами на основі ймовірнісного підходу. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2024. Т. 49, № 1. С. 35–44. DOI: https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-35-44.
13. Волочій Б., Онищенко В., Озірковський Л., Хахула В. Дослідження можливостей підвищення ефективності виявлення безпілотних літальних апаратів. Військово-технічний збірник. 2023. № 29. С. 10–26. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.10-26.
14. Репіло Ю. Є., Ріман О. О., Демидко Д. Л. Підхід до оцінювання ефективності вогневого ураження позицій безпілотних авіаційних комплексів противника ракетними військами і артилерією. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2015. № 1(22). С. 98–102. URL: https://sit.nuou.org.ua/article/download/43879/40167 (дата звернення: 25.08.2026).
15. Johnson J. Analysis of image forming systems. Proceedings of the Image Intensifier Symposium (Fort Belvoir, Virginia, 6–7 October 1958). Fort Belvoir : U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories, 1958. P. 249–273. URL: https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/johnson1958.pdf (дата звернення: 25.08.2026).
16. Vollmerhausen R. H., Jacobs E., Driggers R. G. New metric for predicting target acquisition performance. Optical Engineering. 2004. Vol. 43, No. 11. P. 2806–2818. DOI: https://doi.org/10.1117/1.1799111.
17. Каталоги підтверджують видавництво Pergamon Press, рік 1980, місце видання Elmsford, New York, обсяг X, 369 с. та ISBN 0-08-023135-7 (м'яка обкладинка).
18. Washburn A., Kress M. Combat modeling. New York : Springer, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0790-5.
19. Ball R. E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design. 2nd ed. Reston, VA : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003. 889 p. DOI: https://doi.org/10.2514/4.862519
20. Saaty T. L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. New York : McGraw-Hill International Book Co., 1980. XIII, 287 p. ISBN 0-07-054371-2.
21. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences. 2008. Vol. 1, No. 1. P. 83–98. DOI: https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590.
22. Hitch C. J., McKean R. N. The economics of defense in the nuclear age. Cambridge, MA : Harvard University Press, 1960. VII, 422 p. ISBN 978-0-674-23301-0 (для видання у твердій обкладинці).
23. Олійник І. І., Коробченко С. О., Шостак В. Г. Методологічні основи параметричної оцінки вартості життєвого циклу ОВТ. Озброєння та військова техніка. 2021. № 1(29). С. 3–13. DOI: https://doi.org/10.34169/2414-0651.2021.1(29).03-13.
24. Bai Z., Zhang B., Tian Z., Zou S., Zhu W. Implementing a multi-attribute decision-making-based approach to evaluate small electric vertical takeoff and landing fixed-wing drones with mission efficiency. Aerospace. 2024. Vol. 11, No. 7. Art. 568. DOI: https://doi.org/10.3390/aerospace11070568.
25. Brewczyński K. D., Życzkowski M., Cichulski K., Kamiński K. A., Petsioti P., De Cubber G. Methods for assessing the effectiveness of modern counter unmanned aircraft systems. Remote Sensing. 2024. Vol. 16, No. 19. Art. 3714. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16193714.

26. NATO Standardization Office. Allied joint doctrine for joint intelligence, surveillance and reconnaissance : AJP-2.7. Edition A, Version 1. Brussels : NATO, 2016. URL: https://jadl.act.nato.int/ILIAS/data/testclient/lm_data/lm_152845/Linear/JISR04222102/sharedFiles/AJP27.pdf (дата звернення: 25.08.2026).

References

1. Watling, J., & Reynolds, N. (2023). Meatgrinder: Russian tactics in the second year of its invasion of Ukraine (RUSI Special Report). Royal United Services Institute. https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/special-resources/meatgrinder-russian-tactics-second-year-its-invasion-ukraine
2. Kunertova, D. (2023). The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game. Bulletin of the Atomic Scientists, 79(2), 95–102. https://doi.org/10.1080/00963402.2023.2178180
3. Semenenko, O., Vodchyts, O., Dziubchuk, R., Tarasov, O., Yarmolchyk, M., & Stolinets, S. (2025). Terminolohichni aspekty rozvytku bezpilotnykh system viiskovoho pryznachennia: Ukrainskyi ta zakordonnyi dosvid [Terminological aspects of the development of military unmanned systems: Ukrainian and international experience]. Military Science, 3(3), 47–65. https://doi.org/10.62524/msj.2025.3.3.4
4. Melnychenko, A. (2025). Analiz ta otsiniuvannia faktoriv, yaki vplyvaiut na efektyvnist zastosuvannia bezpilotnykh system v operatsiiakh (boiovykh diiakh) [Analysis and assessment of factors affecting the effectiveness of unmanned systems in operations (combat actions)]. Military Science, 3(2), 210–225. https://doi.org/10.62524/msj.2025.3.2.16
5. Semenenko, O., Ostrovskyi, S., Movchan, A., Melnychenko, A., Stolinets, S., & Petrenko, S. (2024). Rol i mistse roiv bezpilotnykh system v operatsiiakh (boiovykh diiakh) ta varianty yikh zastosuvannia [The role and place of unmanned system swarms in operations (combat actions) and options for their employment]. Social Development and Security, 14(5), 75–86. https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.7
6. Yefremov, O. V., & Korshets, O. A. (2018). Metodyka vyboru ratsionalnoho typu i varianta obladnannia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia vykonannia zavdan [Methodology for selecting a rational type and equipment configuration of unmanned aerial vehicles for mission accomplishment]. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku, 5(51), 3–7. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.003
7. Kravets, T., Polets, O., & Anikolchuk, O. (2023). Otsinka parametriv bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv viiskovoho pryznachennia [Assessment of parameters of military unmanned aircraft systems]. Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva, 2(46), 55–62. https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/61358
8. Koval, V., Dobrovolskyi, Yu., Remez, A., Dziubchuk, R., Zahorodnii, V., & Rotte, S. (2026). Metod voienno-ekonomichnoho otsiniuvannia rozviduvalnykh bezpilotnykh aviatsiinykh system dlia vyboru ratsionalnoho zrazka [A military-economic assessment method for reconnaissance unmanned aircraft systems to select a rational model]. Social Development and Security, 16(4), 420–439. https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.25
9. Katerynchuk, I., & Chernousov, D. (2026). Udoskonalenyi metod vyboru sposobu zastosuvannia pidrozdilu povitrianoi rozvidky [An improved method for selecting the employment approach of an aerial reconnaissance unit]. Social Development and Security, 16(4), 161–173. https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.8
10. Bachynskyi, A. (2026). Otsiniuvannia stsenarno-funktsionalnoi prydatnosti bezpilotnykh aviatsiinykh system do vykonannia zavdan vyiavlennia khimichnoho ta radioaktyvnoho zarazhennia [Assessment of the scenario-functional suitability of unmanned aircraft systems

for chemical and radioactive contamination detection missions]. Social Development and Security, 16(3), 256–270. https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.3.17

11. Ivanchenko, O. V., Kurdiuk, S. V., Khatuntsev, Yu. Yu., & Rudnichenko, S. V. (2023). Analiz mozhlyvostei zastosuvannia ta klasyfikatsiia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia zabezpechennia boiovykh dii Viiskovo-Morskykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy [Analysis of UAV employment capabilities and classification for supporting combat operations of the Ukrainian Navy]. Zbirnyk naukovykh prats DNDI VS OVT, 4(18), 23–33. https://doi.org/10.37701/dndivsovt.18.2023.04
12. Shovkoshytnyi, I. I. (2024). Matematychna model otsiniuvannia efektyvnosti systemy radioelektronnoi borotby z bezpilotnymy litalnymy aparatamy na osnovi ymovirnisnoho pidkhodu [A probabilistic mathematical model for evaluating the effectiveness of an electronic warfare system against unmanned aerial vehicles]. Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony, 49(1), 35–44. https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-35-44
13. Volochii, B., Onyshchenko, V., Ozirkovskyi, L., & Khakhula, V. (2023). Doslidzhennia mozhlyvostei pidvyshchennia efektyvnosti vyiavlennia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Investigation of opportunities to improve unmanned aerial vehicle detection effectiveness]. Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk, 29, 10–26. https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.10-26
14. Repilo, Yu. Ye., Riman, O. O., & Demydko, D. L. (2015). Pidkhid do otsiniuvannia efektyvnosti vohnevoho urazhennia pozytsii bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv protyvnyka raketnymy viiskamy i artyleriieiu [An approach to assessing the effectiveness of missile and artillery strikes against enemy unmanned aircraft system positions]. Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony, 1(22), 98–102. https://sit.nuou.org.ua/article/download/43879/40167
15. Johnson, J. (1958). Analysis of image forming systems. In Proceedings of the Image Intensifier Symposium (pp. 249–273). U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories. https://home.cis.rit.edu/~cnspci/references/johnson1958.pdf
16. Vollmerhausen, R. H., Jacobs, E., & Driggers, R. G. (2004). New metric for predicting target acquisition performance. Optical Engineering, 43(11), 2806–2818. https://doi.org/10.1117/1.1799111
17. Koopman, B. O. (1980). Search and screening: General principles with historical applications. Pergamon Press.
18. Washburn, A., & Kress, M. (2009). Combat modeling. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0790-5
19. Ball, R. E. (2003). The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design (2nd ed.). American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/4.862519
20. Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill International Book Co.
21. 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
22. Hitch, C. J., & McKean, R. N. (1960). The economics of defense in the nuclear age. Harvard University Press.
23. Oliinyk, I. I., Korobchenko, S. O., & Shostak, V. H. (2021). Metodolohichni osnovy parametrychnoi otsinky vartosti zhyttievoho tsyklu OVT [Methodological foundations of parametric life-cycle cost estimation for weapons and military equipment]. Ozbroiennia ta viiskova tekhnika, 1(29), 3–13. https://doi.org/10.34169/2414-0651.2021.1(29).03-13
24. Bai, Z., Zhang, B., Tian, Z., Zou, S., & Zhu, W. (2024). Implementing a multi-attribute decision-making-based approach to evaluate small electric vertical takeoff and landing fixed-wing drones with mission efficiency. Aerospace, 11(7), Article 568. https://doi.org/10.3390/aerospace11070568

25. Brewczyński, K. D., Życzkowski, M., Cichulski, K., Kamiński, K. A., Petsioti, P., & De Cubber, G. (2024). Methods for assessing the effectiveness of modern counter unmanned aircraft systems. Remote Sensing, 16(19), Article 3714. https://doi.org/10.3390/rs16193714
26. NATO Standardization Office. (2016). Allied joint doctrine for joint intelligence, surveillance and reconnaissance (AJP-2.7) (Edition A, Version 1). NATO. https://jadl.act.nato.int/ILIAS/data/testclient/lm_data/lm_152845/Linear/JISR04222102/sharedFiles/AJP27.pdf

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