

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАСТОСУВАННЯ РОДІВ ВІЙСЬК ТА СПЕЦІАЛЬНИХ ВІЙСЬК ПОВІТРЯНИХ СИЛ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

DOI 10.33099/2786-7714-2025-1-8-36-44

УДК 355.424.4

Шкурат Богдан Жоржович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

Шинкарук Олег Миколайович (доктор технічних наук, професор)

<https://orcid.org/0000-0003-4499-8282>

Заболотний Олег Андрійович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0002-5950-5068>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

МЕТОДИКА ВИБОРУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ

Протиповітряна оборона є невід'ємною складовою сучасних бойових дій, а постійний розвиток засобів повітряного нападу, тактики їх застосування та висока динаміка змін обстановки вимагають від посадових осіб швидкого та обґрунтованого вибору способу виконання завдань з прикриття визначених об'єктів з повітря. Для цього необхідні відповідні моделі оцінювання ефективності протиповітряної оборони. Однак існуючі моделі часто не враховують комплексність системи протиповітряної оборони, її сучасний склад, специфіку обстановки та можливі наслідки рішень посадових осіб.

Метою дослідження є удосконалення методики вибору математичних моделей для оцінювання ефективності протиповітряної оборони. Запропонована в статті методика, на відміну від існуючих, ґрунтується на аналізі ефектів бойових дій та вимог до моделювання, що дає змогу адаптувати вибір моделі до конкретних умов обстановки та рівня ухвалення рішень. Результати дослідження можуть бути корисними командувачам угруповань (командирам військових частин) протиповітряної оборони під час прийняття рішень на бойові дії, а також науковим працівникам під час досліджень.

***Ключові слова:** протиповітряна оборона, оцінювання ефективності, математична модель, ефект бойових дій, методика.*

Вступ

Протиповітряна оборона (ППО) є невід'ємною складовою сучасних бойових дій, що доведено збройними конфліктами останніх десятиліть, і насамперед досвідом російсько-української війни (РУВ). Зокрема, в ході РУВ українська система ППО продемонструвала достатню ефективність, що дозволило їй вистояти в перші місяці протистояння та продовжувати виконувати свої завдання [13]. Водночас противник продовжує вдосконалювати як самі засоби повітряного нападу (ЗПН), так і тактику їх застосування, що вимагає від посадових осіб оперативного прийняття рішень на відбиття ударів повітряного противника. В умовах обмеженого часу та високої динаміки бойових дій вибір раціонального рішення серед наявних (або сформованих заново) альтернатив має відбуватися на основі оцінювання їх ефективності з використанням відповідних моделей.

Невірна оцінка варіантів виконання завдань може призвести до неефективних рішень, наслідком

яких є перевитрата ресурсів та втрати як об'єктів, що прикриваються, так і своїх сил та засобів.

Питанням дослідження ефективності ППО присвячено багато матеріалів навчального та наукового характеру.

Дослідженню питань оцінювання ефективності протиповітряної оборони як актуальної наукової проблеми присвячена низка робіт [2-4, 8, 16-20, 22].

Традиційно ефективність ППО оцінюється через ступінь ураження засобів повітряного нападу (ЗПН) відносно їх загальної кількості [2, 16-19, 22]. Цей підхід забезпечує швидку оцінку, проте не враховує особливостей розміщення сил і засобів ППО та їхньої ролі в забезпеченні прикриття об'єктів.

Інший підхід, що базується на розрахунку інтегрального показника ефективності зенітного ракетного прикриття [17, 22], дозволяє оцінювати ураження ЗПН і збереження об'єктів, що прикриваються, та своїх сил і засобів, але не охоплює всі складові системи ППО, зокрема

винищувальну авіацію, управління та РЕБ [10].

В [18] враховані недоліки попередніх підходів, а також запропоновані нові сучасні моделі оцінювання ефективності, проте значна їх кількість потребує чіткого визначення, в яких умовах і яку модель доцільно застосовувати.

Це свідчить про необхідність удосконалення існуючих підходів до оцінювання ефективності ППО або розробки нових, що враховують комплексність та адаптивність системи ППО до умов обстановки.

Метою дослідження є удосконалення методики вибору математичних моделей для оцінювання ефективності ППО в сучасних умовах.

При цьому припускається, що запропоновані в наведених джерелах математичні моделі адекватно відображають реальні процеси в системі ППО, а результати, отримані з їх допомогою, в цілому відповідають наявній статистиці.

У статті аналізуються методики, що застосовуються для оцінювання ефективності існуючих систем ППО оперативного рівня, при цьому питання синтезу їх архітектури розглядається частково (в ракурсі побудови системи для виконання завдань з існуючих сил та засобів).

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що підсистема управління оснащена програмно-апаратним комплексом (або спеціальним математичним забезпеченням) з відповідним набором методик та моделей оцінювання ефективності ППО, а посадова особа, яка приймає рішення, в цілому ознайомена з порядком їх застосування, має відповідну освіту та досвід застосування як засобів управління, так і підлеглих підрозділів ППО.

Матеріали та методи

У роботі використано наукові джерела, керівні (директивні) документи, які стосуються організації системи ППО та оцінювання її ефективності.

Для вивчення існуючих підходів до оцінювання ефективності ППО та їх узагальнення використано загальнонаукові методи аналізу та синтезу, що дозволили виявити їх переваги та особливості застосування. Системний підхід застосовано для комплексного розгляду оцінювання ефективності ППО з урахуванням факторів, які на неї впливають, та очікуваних ефектів бойових дій.

Для класифікації ефектів бойових дій та побудови таблиць вибору математичних моделей використано методи систематизації та таксономії.

Методика вибору математичної моделі розроблена на основі узагальнення існуючих підходів та адаптації їх до потреб оцінювання ефективності ППО, які включають рівень ухвалення рішень, доступні обчислювальні ресурси та вимоги до точності оцінювання.

Результати

Найпростішим підходом до оцінювання ефективності є визначення ступеня досягнення

системою ППО мети свого функціонування через відношення прогнозованої кількості знищених засобів повітряного нападу ($M_{\text{ППО}}$) до їх загальної кількості ($N_{\text{ЗПН}}$) [2, 8, 16, 22]:

$$E_{\text{ППО}} = \frac{M_{\text{ППО}}}{N_{\text{ЗПН}}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Вказаний підхід може застосовуватись в різних варіаціях та математичних моделях в залежності від необхідної точності розрахунків. Поряд з цим, він не враховує особливості побудови системи протиповітряної оборони, а також ступінь виконання створеним угрупованням ППО свого завдання щодо прикриття об'єктів. Зокрема, вказаний підхід застосовується переважно для швидкого оцінювання ефективності ППО держави в цивільних джерелах [13] і показує усереднену оцінку, яка не враховує той факт, що в одних регіонах щільність бойових порядків підрозділів ППО відрізняється від інших. До того ж, озброєння цих підрозділів може суттєво відрізнятися. Тому, наприклад, висвітлюється значення ефективності ППО у протидії балістичним ракетам у розмірі 10%, хоча реально в регіоні, де є зенітні ракетні комплекси, які здатні протидіяти такому типу цілей (Patriot, SAMP/T) цей показник може становити до 100% [15, 21], а в регіонах, де такі комплекси відсутні, складатиме 0%.

Також при оцінюванні ефективності системи ППО як співвідношення кількості знищених цілей до їх загального числа не враховується динаміка бойових дій. Найдоцільніше застосовувати цю методику для швидкого аналізу або прогнозу ефективності функціонування системи ППО на короткий термін.

Оцінювання ефективності ППО з урахуванням динаміки бойових дій, а також шкоди від загроз з повітря, нанесеної військам (силам), що прикриваються та засобам ППО описане в [16]. Поряд з тим, вказана модель зосереджена більше на оцінюванні ефективності зенітного ракетного прикриття і не розглядає внеску інших складових системи ППО в загальний результат.

Однією з розповсюджених методик оцінювання ефективності в сучасних вітчизняних джерелах є та, що пропонує розрахунок інтегрального показника – ступеня досягнення мети зенітного ракетного прикриття визначених об'єктів. Для розрахунку цього показника застосовується сукупність показників, що визначають нанесене ураження засобам повітряного нападу (ЗПН) противника та відвернуту шкоду своїм засобам [16-18, 22]. До першої групи (нанесеної шкоди ЗПН противника) відносяться: математичне очікування кількості знищених ЗПН, математичне очікування кількості напрямків, на яких забезпечується потрібна щільність вогню, вогневий потенціал підрозділів зенітних ракетних військ (ЗРВ). До другої групи (показників відвернутої шкоди об'єктам, що прикриваються, та засобам ЗРВ) відносяться математичне очікування кількості об'єктів прикриття, які збереглися з визначеною

імовірністю, математичне очікування втрат сил і засобів ЗРВ. Такий підхід дозволяє оцінити ефективність зенітного ракетного прикриття, проте потребує подальшого розвитку для застосування при оцінюванні ефективності функціонування системи ППО, оскільки остання має у своєму складі, крім підсистеми зенітного ракетного прикриття, додаткові складові, зокрема підсистеми управління, винищувального авіаційного прикриття, розвідки, радіоелектронної боротьби та забезпечення [10], кожну з яких необхідно оцінити з точки зору внесеного вкладу у загальний результат протиповітряної оборони.

Більш докладно процес оцінювання ефективності функціонування системи протиповітряної оборони із застосуванням запропонованих вище показників нанесеної шкоди ЗПН противника та попередженої шкоди об'єктам, що прикриваються і своїм силам та засобам ППО наведено в [18]. Для зручності отримання інтегрального показника ефективності ППО (K_U) часткові показники оцінювання подаються як відносні. До них відносяться: відносне математичне очікування кількості уражених ЗПН противника (δ_u), відносне зниження бойового потенціалу (БП) для пілотованих і безпілотних засобів ($\delta_{БП\text{ЗПН}}$), відносна величина збереженого БП своїх військ (сил) за рахунок здійснення зенітного ракетного прикриття ($\delta_{БП\text{в(с)}}$), відносна кількість об'єктів інфраструктури, поразення яких за типом А та/або В було відвернуто за рахунок застосування підсистеми ЗРАП ($\delta_{ВДО}$), відносне зниження бойового потенціалу (бойових можливостей) підсистеми ЗРАП ($\delta_{БП\text{ППО}}$) (рис. 1).

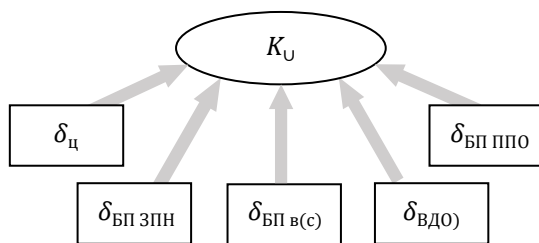


Рисунок 1 – Показники оцінювання ефективності ППО

Вказана методика враховує сучасні загрози з повітря, такі як безпілотні літальні апарати (БПЛА) та комплекси, можливості сил та засобів ППО щодо протидії ним. В методиці запропоновані моделі розрахунку кожного показника, а також якісні рівні ефективності системи ППО та критерії відповідності цим рівням як часткових, так і узагальненого показника ефективності. Все це надає суттєвого прикладного характеру поданому матеріалу, який реально може бути застосований на практиці. Додатково наведені показники ефективності виконання завдань для інших родів військ Повітряних Сил та порядок розрахунку цих показників.

Одночасно, тільки частково враховано впровадження нових технологій протидії ЗПН. Зокрема, російсько-українська війна характеризується стрімким розвитком ЗПН та

тактики їх застосування противником. В повітряних ударах беруть участь майже весь спектр крилатих та балістичних ракет, зенітні керовані ракети, що застосовуються в якості балістичних, керовані авіабомби, БПЛА різних класів та призначення, зокрема ударні БПЛА, що діють на всю глибину території України. Частота і масштаби ударів значно зросли порівняно з 2022 роком [14, 15].

В таких умовах до вже наявних зенітних ракетних комплексів (ЗРК), винищувальної авіації (ВА) та інших класичних загальновійськових засобів ППО (переносні ЗРК, зенітна артилерія, зенітні кулемети) додалися армійська авіація Сухопутних військ [23], легкомоторна авіація [24], а також БПЛА-перехоплювачі [11]. Суттєво зросла роль РЕБ у протидії ЗПН, особливо ударним БПЛА, внаслідок чого останні або кружляють в певному районі до падіння, або змінюють курс, при цьому не досягаючи цілі і навіть потрапляючи у рб або назад до рф [25]. Вказані засоби протидії БПЛА мають бути враховані в існуючому науково-методичному апараті для адекватного оцінювання як потенційних можливостей, так і результатів дій сил та засобів ППО, що частково враховано в сучасних дослідженнях [7, 19, 20], але не об'єднано загальною методикою оцінювання ефективності ППО.

В [18] запропоновано також застосування інших методів оцінювання ефективності системи ППО, як от методи експертних оцінок, теорії нечітких множин, метод аналізу ієрархій. Поряд з тим, таке розмаїття показників та методів призводить до ускладнення розуміння самого порядку оцінювання ефективності системи ППО з науковою метою та при практичному застосуванні визначених сил та засобів.

Комплексний підхід до оцінювання ППО запропоновано в [3], де авторами враховано вимоги до самої системи ППО, фактори, які на неї впливають в конкретних умовах обстановки, сили та засоби, які входять до складу системи ППО. Також враховано завдання противника та можливості щодо їх реалізації. Авторами представлена узагальнена методика оцінювання ефективності системи ППО (рис.2), яка потребує подальшої конкретизації щодо вибору конкретної математичної моделі оцінювання ефективності.

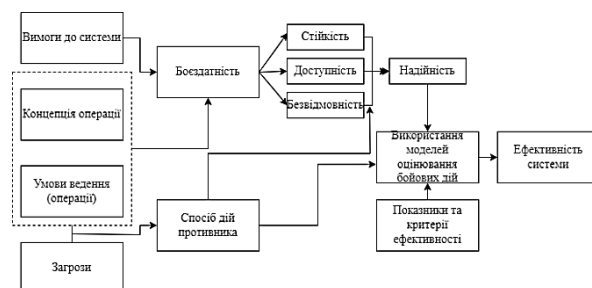


Рисунок 2 – Узагальнена методика оцінювання ефективності системи ППО

Удосконалення цієї методики доцільно розпочати з уточнення самого поняття “ефективності”. Загальною особливістю наведених вище підходів та методик є те, що в них ефективність бойових дій

розглядається як “результативність” (англ. effectiveness), тобто “ступінь реалізації запланованих робіт і досягнення запланованих результатів” [12], в той час як в тому ж джерелі поняття “ефективність” (англ. efficiency) визначено як “співвідношення між досягнутим результатом і використаними ресурсами”.

Результати ураження противником об’єктів різного призначення, а також результати дій своїх військ по знищенню ЗПН можуть бути різними в залежності від ефектів, які планується отримати в результаті функціонування системи. Відповідно до [4-6, 9] результатом роботи системи можуть бути різні ефекти, серед яких варто відзначити не тільки спрямованість цих ефектів, але й часові показники їх прояву. Ефекти від бойових дій можна класифікувати за різними показниками. На рис. 3 наведено узагальнену модифіковану класифікацію ефектів бойових дій. Для зручності сприйняття окремі класифікаційні ознаки ефектів виділені кольором.

Ефекти напряму пов’язані з загальними або частковими цілями завдань операції, що виконуються [1]. Але при цьому виконання одного завдання може супроводжуватись не тільки бажаним ефектом, але й побічними, наслідки яких потрібно передбачити особі, яка приймає рішення. Наприклад, виконання завдання з протиповітряного прикриття адміністративно-промислового центру (великого міста) має на меті недопущення підрозділом ППО ураження визначених об’єктів (підприємств, об’єктів критичної інфраструктури тощо) з повітря від засобів повітряного нападу.

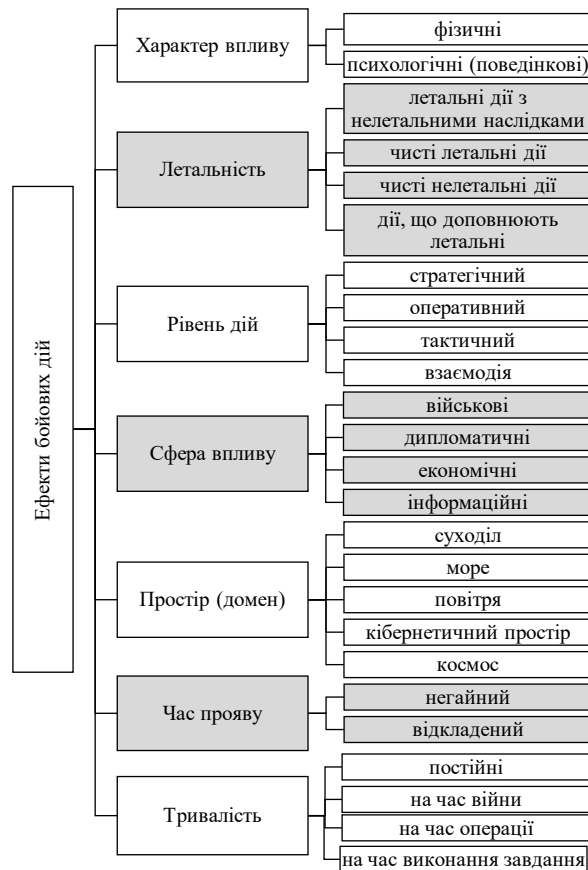


Рисунок 3 – Класифікація ефектів бойових дій

Вказаний ефект може досягатися пасивно (через створення відповідної потужної системи ППО, яка знизить зацікавленість противника в її подоланні); або активно – через відбиття ударів засобів повітряного нападу. В останньому випадку до ефектів можуть належати фізичні (знищення ЗПН), економічні (витрата свого ресурсу у вигляді пального, засобів ураження, інших матеріальних і нематеріальних видів ресурсу, крім того можливі економічні втрати у випадку ураження об’єктів), військові (виконання поставлених завдань), політичні (в залежності від значення об’єктів на політичній арені), а також інформаційні і психологічні (успіхи або невдачі у прикритті об’єктів, можливі влучання у цивільні об’єкти, зокрема, житлові будинки). Як можна побачити, частина ефектів при цьому проявляється негайно (результат бойових дій), а частина – через певний проміжок часу (економічні, політичні, інформаційні наслідки бойових дій). Таким чином, перед особою, яка приймає рішення на виконання завдань з ППО та безпосередньо знищення ЗПН, постає ряд додаткових запитань, які будуть стосуватися ефектів бойових дій, зокрема:

на яких об’єктах зосередити зусилля, щоб зменшити ефективність дій противника?

які вогневі засоби застосовувати, щоб зменшити вартість знищення ЗПН?

скільки часу є на підготовку та застосування відповідних засобів?

в яких зонах застосовувати вогневі засоби, щоб зменшити небажаний вплив наслідків ураження ЗПН (наприклад, падіння уламків цілей та своїх ракет на житлову/промислову забудову)?

та ряд інших запитань.

Пошук відповідей на ці запитання свідчить про те, що не завжди можна обрати найкращий варіант рішення, базуючись лише на оцінці його ефективності за показником відношення отриманого результату до бажаного (максимального). Сучасні умови ведення бойових дій потребують від особи, що приймає рішення, оцінювати ефективність ППО комплексним (зведеним) показником, який базується на показниках отриманого результату, витраченого ресурсу, та нанесеної внаслідок удару шкоди (економічної, політичної, інформаційної, психологічної). Таким чином виникає потреба застосування різних моделей при оцінюванні ефективності варіантів виконання завдань з ППО.

Блок схема загальної адаптивної методики оцінювання ефективності ППО наведена на рис. 4.

В блоці збору вхідних даних узагальнюється та деталізується наявна інформація, а саме:

щодо поставлених завдань: їх загальна мета та часткові цілі, особливості виконання, терміни підготовки, потенційна тривалість виконання завдань;

щодо складу системи ППО – оцінювання кількості та можливостей своїх підрозділів: залучені сили та засоби (ЗРК, зенітна артилерія,

маневрені вогневі групи, БПЛА, авіація за родами, засоби РЕБ тощо), розташування, справність, укомплектованість, наявність засобів ураження, порядок управління, взаємодія з іншими силами та засобами тощо;

щодо варіантів дій противника: напрямки, кількість, типи залучених ЗПН, їх тактико-технічні характеристики, щільність та періодичність ударів, можливі об'єкти ударів тощо;

щодо об'єктів прикриття: їх тип, розташування, можливість виявлення та ураження, потенційні наслідки, на яких об'єктах зосередити зусилля, якщо це не вказано в завданнях вищого командування, потенційні наслідки ураження тощо;

щодо умов виконання завдань: погодні умови, заводова обстановка, особливості району бойових дій та інші фактори, що можуть вплинути на ведення бойових дій.

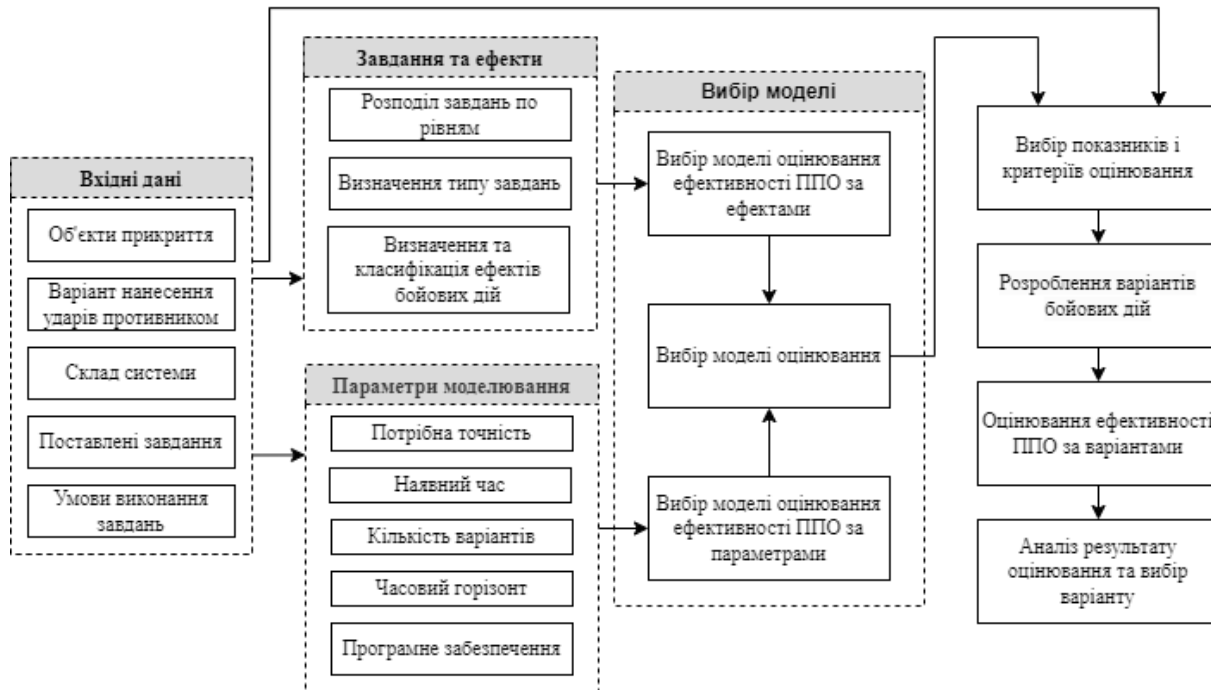


Рисунок 1. Блок-схема загальної адаптивної методики оцінювання ефективності ППО

В блоці завдань та ефектів відбувається розподіл завдань по рівням (стратегічний, оперативний, тактичний) та типам тип (прикриття об'єктів, військ, території, тощо). Також визначаються очікувані ефекти бойових дій, пов'язані з функціонуванням системи ППО та проводиться їх класифікація. В найпростішому випадку ефекти поділяються на:

основні – ті, що безпосередньо пов'язані з досягненням цілей ППО (знищення ЗПН, захист об'єктів);

побічні – ті, що виникають унаслідок виконання завдань (економічні втрати, політичні наслідки, інформаційний та психологічний вплив наслідків).

Додатково ефекти можна розподілити на бажані та небажані. Отримані ефекти доцільно розподілити по пріоритетах: які будуть братися до подальших розрахунків, а які можна ввести в обмеження або знехтувати.

В блоці параметрів моделювання відбувається їх уточнення в залежності від поставлених завдань, термінів підготовки та виконання. В результаті визначаються:

точність моделювання (визначається в залежності від рівня завдань, кінцевої мети моделювання, наявного часу);

наявний на проведення моделювання час;

кількість варіантів дій противника та своїх військ, які за виділений на підготовку час можна встигнути розробити та змоделювати;

часовий горизонт подій, тобто прогнозована тривалість ведення бойових дій, що буде супроводжуватися додатковими розрахунками втрат, витрат ресурсів, часу, маневрів, інших складових;

наявність та можливості програмного та апаратного забезпечення

У блоці вибору моделі відбувається визначення доцільних математичних моделей за результатами аналізу завдань та ефектів, а також параметрів моделювання.

Так, в ході аналізу ефектів встановлюється відповідність математичних моделей оцінювання ефективності певним категоріям ефектів бойових дій, варіант якої наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Відповідність математичної моделі оцінювання ефективності ППО ефектам бойових дій

Категорія ефектів	Модель оцінювання ефективності ППО
Фізичні (знищення ЗПН, захист об'єктів)	Відношення знижених цілей до загальної кількості ЗПН
Економічні (витрати ресурсів, збитки внаслідок ураження)	Відношення результату до витрат
Військові (стійкість ППО, виконання завдань)	Комплексний показник виконання завдань, імітаційне моделювання, воєнна гра
Політичні (імідажі наслідки)	Методи експертних оцінок, нечітких множин
Інформаційні (витік, перекручення інформації, пропаганда)	Нечіткі множини, метод аналізу ієрархій
Психологічні (наслідки для особового складу цивільного населення)	Воєнна гра, методи експертних оцінок

В залежності від результатів подальших досліджень або їх специфіки та потреб, відповідність моделей певній групі ефектів може змінюватись.

В результаті визначення вимог до моделей доцільно також керуватися критеріями вибору, варіант яких наведено в табл. 2. Кожна категорія вимог може поділятися на різну кількість критеріїв. Значення кількісних або якісних показників відповідності критеріям поділу також можуть варіюватися.

Потім здійснюється остаточний вибір моделі (або моделей), як правило, шляхом порівняння отриманих результатів вибору за ефектами та за вимогами до моделей. Тут можливе отримання декількох варіантів: одна модель для подальших розрахунків, послідовне застосування декількох моделей для підвищення точності, або застосування різних моделей для розрахунку окремих показників ефективності ППО.

Таблиця 2

Критерії вибору математичної моделі оцінювання ефективності ППО за вимогами до моделювання

Категорія вимог	Мінімальні вимоги	Середні вимоги	Високі вимоги
Потрібна точність	Низька точність (похибка понад 10%)	Середня точність (похибка 5-10%)	Висока точність (похибка до 5%)
Час на оцінювання	До 1 доби	Від 1 до 7 діб	Більше 7 діб
Кількість варіантів	1-3 варіанти	4-10 варіантів	10+ варіантів
Часовий горизонт	1-3 доби	до 30 діб	понад 30 діб
Програмне забезпечення	Відсутнє або загальноживані комп'ютерні програми (MS Office, OpenOffice, різні види табличних редакторів та калькуляторів)	Спеціальне програмне забезпечення, апаратні комплекси імітації бойових дій	Системи імітації бойових дій Спеціалізовані математичні моделі (наприклад, Matlab)
Запропоновані моделі	Метод експертних оцінок (вимоги до експертів спрощені), коефіцієнтні методики, комплексний показник	Комплексний показник виконання завдань, імітаційне моделювання, воєнна гра, метод аналізу ієрархій	Весь спектр моделей та методик

Якщо вибір моделі оцінювання ефективності ППО за ефектами бойових дій і вимогами до моделей дає різні результати, потрібно знайти компроміс або здійснити комбінований підхід. Одним з варіантів може бути надання пріоритету одному з показників вибору (ефекти чи вимоги до моделей). Наприклад, перевага може бути надана вибору за ефектами бойових дій у випадку, якщо оцінка потрібна для прийняття рішення щодо наслідків (наприклад, інформаційних або дипломатичних ефектів, де математичні моделі менш корисні). І навпаки, математичні або імітаційні моделі матимуть перевагу у випадку застосування програмного забезпечення, підвищених вимог до точності або швидкості розрахунків.

Якщо неможливо віддати перевагу тому чи іншому критерію вибору, можливі різні комбінації варіантів: послідовне застосування найбільш доречних моделей з кожного блоку, або застосування змішаних методів, наприклад, комбінації методів експертних оцінок з

розрахунками або імітаційним моделюванням певних етапів бойових дій.

Після вибору математичної моделі здійснюється уточнення показників та критеріїв моделювання бойових дій, а далі слідує класична послідовність кроків, що здійснюються при плануванні бойових дій: розроблення варіантів ведення бойових дій з ППО, їх моделювання, узагальнення результатів, їх аналіз та вибір найбільш доцільного варіанту в заданих умовах.

Обговорення

Науковий апарат оцінювання ефективності бойових дій пропонує широкий спектр різних за специфікою використання математичних моделей. Проведений аналіз результатів наявних досліджень ефективності ППО, узагальнення їх переваг, недоліків та особливостей використання дозволив авторам запропонувати удосконалену методику вибору математичної моделі серед наявного переліку.

На відміну від існуючих, запропонована методика передбачає процес вибору інструменту моделювання, який базується на комплексному врахуванні вихідних даних, очікуваних та

побічних ефектів бойових дій. Важливим аспектом є гнучкість методики, що дозволяє адаптувати її до різних рівнів ухвалення рішень – від тактичного до стратегічного. До користувачів методики можуть належати наукові працівники, дослідники, командувачі угруповання ППО, командири військових частин та підрозділів.

Запропонований підхід включає можливість інтеграції часткових методик, зокрема для оцінювання противника, своїх сил та засобів, характеристик об'єктів прикриття тощо. Поряд з тим, окремі аспекти методики потребують подальших досліджень, зокрема щодо порядку прогнозування та класифікації ефектів бойових дій, впливу різних типів ефектів на ефективність ППО та виконання поставлених завдань в цілому.

Формат таблиць вибору моделей може варіюватися залежно від конкретних умов моделювання, вихідних даних та рівня деталізації оцінки. Наведені у статті таблиці є прикладом, і можуть бути адаптовані до специфічних потреб.

В ході дослідження проаналізовано далеко не всі наявні математичні моделі. Основними факторами вибору є мета моделювання, доступні математичні моделі та наявні обчислювальні можливості дослідника або особи, яка приймає рішення.

Математичні моделі оцінювання ефективності ППО можуть застосовуватися як у повному обсязі, так і частково, залежно від складу сил та засобів. Наприклад, при аналізі бойових дій може бути враховано або не враховано застосування БПЛА, авіації, засобів ППО Сухопутних військ тощо.

Запропонована методика сприяє більш обґрунтованому вибору математичних моделей оцінювання ефективності ППО, що підвищує точність аналізу та відповідність отриманих результатів реальним умовам застосування.

Висновки

У статті узагальнено підходи до оцінювання ефективності ППО та представлено удосконалену методику вибору математичних моделей, яка враховує вихідні дані, очікувані та побічні ефекти бойових дій. На відміну від існуючих, запропонована методика передбачає процес вибору інструменту моделювання, який базується на аналізі ефектів бойових дій та вимог до моделей.

Застосування розробленої методики сприяє підвищенню обґрунтованості вибору математичних моделей, що покращує точність оцінювання ефективності ППО. Гнучкість методики дозволяє її адаптацію до специфічних умов моделювання, з урахуванням доступних обчислювальних ресурсів та особливостей виконання завдань.

Список використаних джерел

1. Comprehensive Operations Planning Directive. Mons, Belgium : Supreme Headquarters Allied Powers Directorate. 2023, 501 p.
2. Efektywność obrony przeciwlotniczej. Kontekst teoretyczny i praktyczny. Adam Radomyski, Daniel

Michalski. Dęblin, wyd. Lotniczej Akademii Wojskowej, 2020. 175 s.

3. Hashimov, E., Khudeynatov, E. Methodology for assessing the effectiveness of the air defense system. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2024, №75 (Том 1). С.21-27. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.021>

4. Holmes James M. The Counterair Companion. A Short Guide to Air Superiority for Joint Force Commander. Alabama : Air University Press, Maxwell Air Force Base, 1995, 78 p.

5. Hunter Stoll, John Hoehn, William Courtney. "Air Defense Shapes Warfighting in Ukraine, 2024", Feb. 22. URL : <https://www.rand.org/pubs/commentary/2024/02/air-defense-shapes-warfighting-in-ukraine.html> (дата звернення 28 січ. 2025)

6. Jux, Adam. "Non-Lethal Measures of Effectiveness in Targeting." Joint Air Power Competence Center. <https://www.japcc.org/articles/non-lethal-measures-of-effectiveness-in-targeting/> (дата звернення 30 січ. 2025).

7. Meulman, Frederik H., "Towards a Coherent and Effective Surface Based Air and Missile Defence (SBAMD) as a Key Pillar of NATO -Integrated Air and Missile Defence System". Joint Air Power Competence Center. <https://www.japcc.org/chapters/missile-defence-in-nato/> (дата звернення 30 січ. 2025).

8. Michalski, D., & Adam, R. Counting the Uncountable. Introduction to the New Method of Evaluation of the Efficiency of Air Defense. Safety & Defense, 6(2), 2020, p. 100-112. <https://doi.org/10.37105/sd.91>.

9. Paul K. Davis, "Effect-Based Operations". Monograph report. 2001. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/2006/MR1477.pdf/

10. Доктрина з охорони повітряного простору та протиповітряного прикриття важливих державних і військових об'єктів : затв. Головнокомандувачем ЗС України 28.12.2020 р. Київ : ГШ ЗС України, 2020. 34 с

11. Дрони-дракони і перехоплювачі. Чи справді українці здійснили революцію в БПЛА. BBC. <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/cy9e90rv280o> (дата звернення 30 січ. 2025).

12. ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. Вид. офіц. Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2016. 49 с.

13. Ефективність української протиповітряної оборони суттєво впала, — WSJ. URL : <https://texty.org.ua/fragments/112452/efektyvnist-ukrayinskoyi-protypovitryanoyi-oborony-suttjevo-vpala-wsj/>

14. Понад 11 тис. дронів та 1,3 тис. ракет. Сили ППО підбили підсумки за 2024 рік. Главком. <https://glavcom.ua/country/incidents/ponad-11-tis-droniv-ta-1-3-tis-raket-sili-ppo-pidbili-pidsumki-za-2024-rik-1038483.html> (дата звернення 30 січ. 2025).

15. Командування Повітряних Сил ЗСУ. Офіційна публічна сторінка в Facebook [ps.mil.gov.ua]. Дата звернення: 30 січ. 2025. [Онлайн]. Доступно: <https://www.facebook.com/kpszs>.

16. Модель оцінювання ефективності підрозділів протиповітряної оборони / С. П. Коваленко [та ін.] // Сучасні інформаційні системи. – 2021. – Т. 5, № 2. – С. 21-28. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.03>

17. Моделювання бойових дій зенітного ракетного підрозділу : підручник / С. П. Ярош, М. О. Єрмошин, Г. А. Дробаха та ін. – Х. : ХУПС, 2014. – 380 с.

18. Оцінювання ефективності бойових дій підрозділів родів військ Повітряних Сил : навч. посібн. / С. П. Ярош, А. О. Бережний, В. Г. Малюга, Д. О. Меленті. – Х. : ХНУПС, 2024. – 180 с.

19. Печененко О. М., Ярошенко Я. В., Блискун О. Є. Загальні підходи до оцінювання ефективності протиповітряної оборони з урахуванням застосування FPV-дронів-перехоплювачів. Повітряна міць України. 2024, №2(7). С. 50-54. URL: <http://sap.nuou.org.ua/article/view/314841/307467>

20. Попов С. Е., Пуховий О. В., Юфа С. А. Визначення сукупності показників для оцінювання ефективності функціонування системи управління угруповання радіотехнічних військ Повітряна Міць України. К. : НУОУ. 2024. №2(7). С. 11-17.

21. Сили ППО збили 5 ворожих балістичних ракет і 40 російських дронів із 65. Лівий Берег. https://lb.ua/society/2024/12/20/651229_sili_ppo_zbili_5_vorozhnh_balistichnih.html (дата звернення 30 січ. 2025).

22. Синтез адаптивних структур системи зенітного ракетно-артилерійського прикриття об'єктів і військ та оцінка їх ефективності / А. Я. Торопчин, І. О. Кириченко, М. О. Єрмошин та ін. Харків : ХУПС, 2006. 431 с.

23. Український Ми-8 збив російський Shahed-136. Веб-портал “Мілітарний”. <https://mil.in.ua/uk/news/ukrayinskyj-my-8-zbyv-rosijskij-shahed-136> (дата звернення 30 січ. 2025).

24. Українські пілоти на старому літаку Як-52 з дробовика знищують російські дрони. Forbes. https://24tv.ua/litak-yak-52-znishhuje-rosiyski-droni-drobovika-video-roboti_n2586756 (дата звернення 30 січ. 2025).

25. Щонайменше 12 “шахедів” залетіло у ніч з 12 на 13 листопада до Білорусі, 2 зникли, один долетів до Річці і повернувся в Україну, зробивши коло у понад 200 км. Суспільне Новини. <https://susplne.media/879115-sonajmense-12-droniv-zaletili-do-bilorusi-ciei-noci-belaruski-gaun/> (дата звернення 30 січ. 2025).

METHODOLOGY FOR SELECTING MATHEMATICAL MODELS TO ASSESS AIR DEFENSE EFFECTIVENESS

Bohdan Shkurat (Doctor of Philosophy)

<https://orcid.org/0000-0003-4499-8282>

Oleh Shynkaruk (Doctor of Technical Sciences, Professor)

<https://orcid.org/0000-0003-4499-8282>

Oleh Zabolotny (Candidate of military sciences, Associate professor)

<https://orcid.org/0000-0002-5950-5068>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Air defense is an important component of modern warfare. The continuous development of aerial attack systems, their tactics, and the high dynamics of the operational environment require decision-makers to quickly and reasonably select methods for protecting designated assets from aerial threats. This necessitates appropriate models for evaluating air defense effectiveness. However, existing models often fail to take in account the complexity of air defense systems, their modern composition, the specifics of the operational environment, and the potential consequences of command decisions.

The aim of the paper is to develop a methodology for selecting mathematical models to assess air defense effectiveness. Unlike existing approaches, the proposed methodology is based on a comprehensive consideration of initial data, allowing the selection of models to be adapted to specific conditions and decision-making levels. The research findings may be useful to air defense force commanders (military unit commanders) in combat decision-making, as well as to researchers conducting related studies.

Keywords: *air defense, effectiveness assessment, mathematical model, combat effects, methodology.*

References

1. Comprehensive Operations Planning Directive. Mons, Belgium : Supreme Headquarters Allied Powers Directorate. 2023, 501 p.

2. Efektywność obrony przeciwlotniczej. Kontekst teoretyczny i praktyczny. Adam Radomyski, Daniel Michalski. Dęblin, wyd. Lotniczej Akademii Wojskowej, 2020. 175 s.

3. Hashimov, E., Khudeynatov, E. Methodology for assessing the effectiveness of the air defense system. Control, navigation and communication systems. 2024, №75 (Issue 1). P.21-27. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.021>

4. Holmes James M. The Counterair Companion. A Short Guide to Air Superiority for Joint Force Commander. Alabama

: Air University Press, Maxwell Air Force Base, 1995, 78 p.

5. Hunter Stoll, John Hoehn, William Courtney. “Air Defense Shapes Warfighting in Ukraine, 2024”, Feb. 22. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://www.rand.org/pubs/commentary/2024/02/air-defense-shapes-warfighting-in-ukraine.html>.

6. Jux, Adam. “Non-Lethal Measures of Effectiveness in Targeting.” Joint Air Power Competence Center. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://www.japcc.org/articles/non-lethal-measures-of-effectiveness-in-targeting/>.

7. Meulman, Frederik H., “Towards a Coherent and Effective Surface Based Air and Missile Defence (SBAMD) as

- a Key Pillar of NATO -Integrated Air and Missile Defence System”. Joint Air Power Competence Center. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://www.japcc.org/chapters/missile-defence-in-nato/>.
8. Michalski, D., & Adam, R. Counting the Uncountable. Introduction to the New Method of Evaluation of the Efficiency of Air Defense. *Safety & Defense*, 6(2), 2020, P. 100-112. <https://doi.org/10.37105/sd.91>.
9. Paul K. Davis, “Effect-Based Operations”. Monograph report. 2001. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/2006/MR1477.pdf/
10. Doktryna z okhorony povitrianoho prostoru ta protypovitrianoho prykryttia vazhlyvykh derzhavnykh i viiskovykh ob'ektiv : zatv. Holovnokomanduvachem ZS Ukrainy 28.12.2020 r. Kyiv : HSh ZS Ukrainy, 2020. 34 s.
11. Drony-drakony i perekhopliuvachi. Chy spravdi ukraintsi zdiisnyli revoliutsiiu v BPLA. VVS.. BBC. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/cy9e90rv280o>.
12. DSTU ISO 9000:2015. Systemy upravlinnia yakistiu. Osnovni polozhennia ta slovnyk terminiv. Vyd. ofits. Kyiv : DP “UkrNDNTs”, 2016. 49 s.
13. Efektyvnist ukrainskoi protypovitrianoi oborony suttievo vpala, — WSJ. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://texty.org.ua/fragments/112452/efektyvnist-ukrayinskoyi-protypovitrianoi-oborony-suttievo-vpala-wsj/>.
14. Ponad 11 tys. droniv ta 1,3 tys. raket. Syly PPO pidbyly pidsumky za 2024 rik. Hlavkom. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://glavcom.ua/country/incidents/ponad-11-tis-droniv-ta-1-3-tis-raket-sili-ppo-pidbili-pidsumki-za-2024-rik-1038483.html>.
15. Komanduvannia Povitrianykh Syl ZSU. Ofitsiina publiczna storinka v Facebook [@ps.mil.gov.ua]. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://www.facebook.com/kpszs>.
16. Model otsiniuvannia efektyvnosti pidrozdiliv protypovitrianoi oborony / S. P. Kovalenko [ta in.] // Suchasni informatsiini systemy. – 2021. – T. 5, № 2. – S. 21-28. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.03>
17. Modeliuvannia boiovykh dii zenitnoho raketnoho pidrozdilu : pidruchnyk / S. P. Yarosh, M. O. Yermoshyn, H. A. Drobakha ta in. – Kh. : KhUPS, 2014. – 380 s.
18. Otsiniuvannia efektyvnosti boiovykh dii pidrozdiliv rodiv viisk Povitrianykh Syl : navch. posibn. / S. P. Yarosh, A. O. Berezhnyi, V. H. Maliuha, D. O. Melenti. – Kh. : KhNUPS, 2024. – 180 s.
19. Pechenko O. M., Yaroshenko Ya. V., Blyskun O. Ye. Zahalni pidkhody do otsiniuvannia efektyvnosti protypovitrianoi oborony z urakhuvanniam zastosuvannia FPV-droniv-perekhopliuvachiv. *Povitriana mits Ukrainy*. 2024, №2(7). S. 50-54. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <http://sap.nuou.org.ua/article/view/314841/307467>
20. Popov S. E., Pukhovi O. V., Yufa Ye. A. Vyznachennia sukupnosti pokaznykiv dlia otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia systemy upravlinnia uhrupovannia radiotekhnichnykh viisk Povitriana Mits Ukrainy. K. : NUOU. 2024. №2(7). S. 11-17.
21. Syly PPO zbyly 5 vorozhykh balistychnykh raket i 40 rosiiskykh droniv iz 65. Livyi Bereh. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: https://lb.ua/society/2024/12/20/651229_sily_ppo_zbili_5_vorozhykh_balistychnykh_raket_i_40_rosiiskykh_droniv_iz_65_livyi_bereh.html.
22. Syntez adaptivnykh struktur systemy zenitnoho raketno-artyleriiskoho prykryttia ob'ektiv i viisk ta otsinka yikh efektyvnosti / A. Ya. Toropchyn, I. O. Kyrychenko, M. O. Yermoshyn ta in. Kharkiv : KhUPS, 2006. 431 s.
23. Ukrainskyi My-8 zbyv rosiiskyi Shahed-136. Vebportal “Military”. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://mil.in.ua/uk/news/ukrayinskyj-my-8-zbyv-rosiiskyj-shahed-136>.
24. Ukrainski piloty na staromu litaku Yak-52 z drobovykha znyshchuiut rosiiski drony. Forbes. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: https://24tv.ua/litak-yak-52-znishchuye-rosiiskyi-droni-drobovika-video-roboti_n2586756.
25. Shchonaimeshe 12 “shakhediv” zaletilo u nich z 12 na 13 lystopada do Biorusi, 2 znykly, odyn doletiv do Richytsi i povernuvsia v Ukrainu, zrobyvshy kolo u ponad 200 km. *Suspilne Novyny*. Accessed: Jan. 30, 2025 [Online]. Available: <https://suspilne.media/879115-sonajmense-12-droniv-zaletili-do-biorusi-ciei-noci-belaruski-gaun/>.