

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПІЛОВОАНОЇ ТА БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ

[DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-61-72](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-61-72)

[УДК 004.94:629.7.017.1+629.7.018:004.942](https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-2-7-61-72)

<sup>1</sup>Шовкошитний Ігор Іванович (кандидат військових наук, старший науковий співробітник)  
<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

<sup>2</sup>Василенко Ольга Анатоліївна  
<https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

<sup>1</sup>Національний університет оборони України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна

### ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОЇВ УДАРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ УРАЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ГРУПОВИХ ЦІЛЕЙ

Досвід російсько-української війни свідчить про те, що одним із перспективних напрямів підвищення ефективності ведення бойових дій в сучасних умовах є перехід до групового (ройового) застосування безпілотної систем для виконання розвідувальних і ударних завдань. Зважаючи на це, статтю присвячено вирішенню актуального наукового завдання, яке полягає у виборі показників оцінювання ефективності застосування роїв ударних безпілотної літальних апаратів для ураження нестационарних групових цілей.

У публікації висвітлено завдання роїв ударних БпЛА, що поділяються на бойові завдання та завдання підтримки (забезпечення) бойових дій. Виконання кожного з них потребує оцінювання з метою ухвалення обґрунтованих рішень та коригування стратегій ройового застосування ударних БпЛА, які виконуватимуть комплекс завдань щодо виявлення, розпізнавання, ураження як одиночних об'єктів, так і нестационарних групових цілей противника. Таке оцінювання потребує наявності відповідних показників ефективності. З огляду на це, у статті наведено основні вимоги до таких показників, запропоновано варіант загальної класифікації показників ефективності застосування роїв ударних БпЛА з умовним розподілом їх на декілька груп, основними з яких є: функціональні, часові, просторові, часткові, інтегральні, експлуатаційні, воєнно-економічні. Також наведено пояснення та очікувані варіанти функціональних залежностей зазначених показників та інших додаткових параметрів, які впливатимуть на ефективність застосування роїв ударних БпЛА.

Під час проведення дослідження застосовано загальнонаукові методи (аналізу, порівняння), окремі положення системного підходу, теорії імовірностей та теорії надійності систем, а також воєнно-економічного аналізу. Запропоновані показники ефективності можуть бути використані під час формування моделей оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА.

**Ключові слова:** ударні безпілотної літальні апарати, рій, ройові технології, ефективність застосування, показники ефективності, ураження нестационарних групових цілей.

#### Вступ

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності ведення бойових дій в сучасних умовах є перехід до групового (ройового) застосування безпілотної систем [1–5]. Це підтверджується бойовими діями під час відбиття широкомасштабної збройної агресії російської федерації проти України. Зокрема, в ході бойових дій РФ використовує практику завдання групових ударів БпЛА-камікадзе “Shahed-136” (“Герань-2”),

Ланцет, КУБ-БЛА по об'єктах військової та цивільної інфраструктури [6]. Тенденція до групового застосування ударних БпЛА нині широко впроваджується й у Збройних Силах України (далі – ЗС України), відпрацьовуються форми і способи застосування таких літальних апаратів, які стають суттєвою альтернативою в умовах браку засобів ураження. Протягом останнього року значно зросли обсяги застосування у тактичній ланці FPV-БпЛА, номенклатура та

різновиди яких стрімко збільшуються. Оснащення ударних БпЛА бойовою частиною вагою від сотень грамів до десятків кілограмів дозволяє уражати різні типи цілей у тактичній, а також оперативно-тактичній глибині.

Слід зазначити, що одним із перспективних напрямів нині вважається застосування роїв ударних БпЛА, які прогнозовано матимуть більшу ефективність порівняно із простим застосуванням групи ударних БпЛА, адже теоретично поведінка “роїв” передбачає застосування роєвих алгоритмів на основі принципів самоорганізації, штучного інтелекту й так званих технологій “машинного зору”, що загалом впливає на стійкість рою до впливу зовнішніх факторів, і, як наслідок, – до їхньої результативності. Застосування штучного інтелекту дає можливість об’єднувати БпЛА у рої та організувати обмін інформацією між ними, а також забезпечити самостійне взаємоузгоджене вирішення завдань зі збирання та оброблення інформації щодо складних об’єктів і групових цілей, ідентифікувати їхні елементи, здійснювати розподіл між ударними БпЛА та уражати їх [7–8].

Є інформація щодо випробовування українських аналогів БпЛА “Ланцет” з використанням технологій штучного інтелекту, який забезпечуватиме можливість роєвого застосування груп БпЛА [9]. Українською компанією “Swarmet” розробляється технологія на базі штучного інтелекту, яка дасть можливість об’єднати в єдину мережу одразу кілька десятків БпЛА під управлінням одного пілота [10].

Незважаючи на те, що переваги застосування рою БпЛА є очевидними, цей напрям у ЗС України перебуває на початковому етапі. В умовах відпрацювання тактики групового застосування ударних БпЛА, розвитку та впровадження нових форм і способів ураження з їхньою допомогою об’єктів виникає потреба в оцінюванні ефективності такого застосування. Судячи з наявного бойового досвіду, можна стверджувати, що суттєвими чинниками, які впливають на ефективність застосування груп (роїв) ударних БпЛА, є: можливість та оперативність виявлення та розпізнавання об’єктів ураження, їхня просторова досяжність, спроможність подолання групою БпЛА системи протиповітряної оборони або системи комплексної вогневої та радіоелектронної протидії, ступінь адаптації групи (рою) БпЛА до змін у навколишньому середовищі.

Проте питання щодо оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей досліджені недостатньо. З огляду на зазначене, обрана тема статті, яка присвячена вибору показників та критеріїв такого оцінювання, є актуальною.

Проблеми впровадження технологій роєвого застосування роботизованих комплексів, зокрема БпЛА, досліджуються у багатьох країнах [11]. У [12] розглянуто сучасні погляди на застосування пілотованої та безпілотної авіації в майбутніх військових конфліктах, проведено порівняння завдань, які можуть нею виконуватись. Здійснено класифікацію завдань для спільних авіаційних груп

пілотованої та безпілотної авіації. Питання щодо групового застосування пілотованої авіації для ураження типових об’єктів, а також методичні особливості опису виконання цього завдання ретельно розглядалися у [13]. Класичні підходи до оцінювання ефективності подолання літальними апаратами зони дії ешелюваної протиповітряної оборони досить повно описані в [14, 15].

У роботі [16] розроблено метамодель мультиагентної системи пошуку та впливу на наземний об’єкт групою безпілотної літальних апаратів у разі централізованого варіанта управління. Проведено аналіз досвіду групового застосування безпілотної літальних апаратів під час виконання завдань із пошуку та впливу на об’єкти земної поверхні, визначено ролі агентів та їхні завдання у складі групи. Також визначено завдання інтелектуальної системи управління безпілотної літальними апаратами.

У [17, 18] здійснено аналіз групового застосування БпЛА, у тому числі у спільних бойових порядках з пілотованими, окреслено особливості такого застосування та напрямки досліджень, необхідних для розвитку систем автоматичного керування групами літальних апаратів.

У [19] зосереджено увагу на забезпеченні узгодженого переміщення групи літальних апаратів у просторі. Зокрема, розроблено математичну модель руху БпЛА на основі алгебри дуальних кватерніонів з урахуванням обертального та поступального руху літальних апаратів. У [20, 21] розглянуто проблеми управління групою БпЛА, акцентовано увагу на зростанні складності керування нею у процесі збільшення кількості апаратів. У [22] запропоновано математичну модель узгодженого руху групи БпЛА на основі методу потенціалів, у якій враховано проблемні питання, що стосуються сумісного безаварійного руху декількох БпЛА, уникнення фізичних перешкод на шляху руху, обходу потенційно небезпечної зони, інформаційної зв’язності окремих апаратів. Крім того, запропоновано модель процесу управління повітряним рухом на основі нейронних нечітких мереж.

У дисертаціях [23–25] розглянуто питання щодо організації групового застосування БпЛА. У роботі [26], присвяченій проблемам застосування роєвого інтелекту та побудови стійких керованих груп роботів, автором наголошується, що більшість розробок частіше стосуються вирішення окремої вузькоспеціалізованої проблеми (зокрема знаходження найкоротшого шляху між окремими точками, пошуку ресурсів тощо). Особливо підкреслено проблематику побудови алгоритмів колективної поведінки, а також сформульовано основні вимоги до алгоритмів реалізації колективної поведінки групи роботів.

Отже, очевидно, що окремі питання щодо роєвого застосування об’єктів досліджено достатньо повно. Водночас, можна стверджувати, що у жодному з наведених джерел проблемні питання стосовно оцінювання ефективності роєвого застосування ударних БпЛА, системно не

розглядалися, а перелік показників та критеріїв ефективності досі не сформовано, що підкреслює актуальність теми цієї публікації.

Зважаючи на зазначене, метою статті є вибір показників оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей.

### Матеріали та методи

Дослідження обраної у статті тематики базується на загальнонаукових методах (аналізу, порівняння), положеннях системного підходу до розв'язання складних завдань, окремих положеннях теорій імовірності, надійності систем та воєнно-економічному аналізі.

### Результати

Перш ніж сформулювати заявлені показники, доцільно визначити загальні особливості застосування роїв ударних БпЛА. Згідно із [7] під "роєм БпЛА" будемо розуміти групу БпЛА, управління якою здійснюється за допомогою штучного інтелекту із застосуванням алгоритмів самоорганізації, а під "ударними БпЛА" – бойові БпЛА, що здатні самостійно виконувати розвідувальні й ударні завдання з метою виявлення (власними бортовими засобами розвідки) наземних і морських цілей (об'єктів) та їх подальшого ураження бортовою зброєю – інтегрованою бойовою частиною. Складною перспективною задачею для роїв ударних БпЛА є ураження нестационарних групових цілей, під якими слід розуміти рухомі або змінювані у часі й просторі об'єкти, що підлягають ураженню в умовах бойових дій. На відміну від стаціонарних цілей, такі об'єкти можуть змінювати своє місце розташування, швидкість, напрямок руху або інші параметри, що значно ускладнює процес їхнього виявлення, відстеження та знищення ударними БпЛА.

Загалом рої БпЛА на полі бою можуть вирішувати такі завдання:

а) перша група – бойові завдання щодо: виявлення, розпізнавання одиночних і групових цілей (як стаціонарних, так і нестационарних) на землі, водній поверхні та у повітрі;

завдання ударів по групах типових наземних та надводних зосереджених цілей на полі бою (особовий склад противника, зразки озброєння та військової техніки, елементи бойового порядку), а також важливих елементах критичної інфраструктури;

ведення групового повітряного бою з ураженням типових пілотованих та безпілотної літальних апаратів противника (перспективне завдання);

оперативне створення перешкод радіоелектронним системам і засобам управління військами і зброєю противника (перспективне завдання);

б) друга група – завдання підтримки (забезпечення) бойових дій:

ускладнення та дезорганізація функціонування об'єктові та військової ППО шляхом формування хибної повітряної обстановки та імітації групового застосування бойових засобів;

цілевказання засобам вогневого ураження, у тому числі ударним БпЛА;

ретрансляція радіосигналів, формування (розширення) мереж радіозв'язку та передавання даних;

коригування вогню підрозділів ракетних військ і артилерії на значних ділянках лінії зіткнення; дистанційне мінування (розмінування) ділянок місцевості та окремих об'єктів;

дистанційне ведення РХБ розвідки; виконання окремих логістичних завдань (доставка малогабаритних вантажів, зокрема боєприпасів, засобів медичної допомоги тощо); деморалізація та підлив морально-психологічного стану особового складу противника шляхом поширення агітаційних матеріалів, демонстраційних польотів тощо.

імітація групових нальотів засобів повітряного нападу (роїв БпЛА) з метою тренування обслуг засобів ППО та пілотів винищувальної й армійської авіації.

Слід зауважити, що кожне із цих завдань застосування роїв БпЛА може потребувати визначення відповідних показників ефективності. Проте у статті увагу зосереджено на визначенні показників ефективності виконання завдань першої групи, зокрема застосування роїв ударних БпЛА для виявлення, розпізнавання, ураження одиночних цілей і нестационарних групових цілей противника.

Правильно визначені показники ефективності сприятимуть ухваленню обґрунтованих рішень та коригуванню стратегій для досягнення найкращих результатів ройового застосування ударних БпЛА.

Основні вимоги до показників ефективності:

чітка визначеність, зрозумілість, повнота та точність опису змісту вимірюваних параметрів, легка інтерпретованість, простота обчислювання; чутливість до будь-яких впливів внутрішніх і зовнішніх факторів;

можливість отримання кількісних значень, які можна об'єктивно оцінювати (це не виключає можливості використання й чітко сформульованих якісних показників);

реалістичність, досяжність, зв'язок із загальними цілями системи.

Важливо також враховувати, що обрані показники ефективності за необхідності може бути скориговано залежно від змін у зовнішньому середовищі або еволюції систем чи процесів.

Взявши до уваги основи системного підходу до оцінювання ефективності складних систем [27–31], показники ефективності рою ударних БпЛА слід розділити на внутрішньосистемні та показники ефективності, які задаються надсистемою (тобто системою, в інтересах якої буде застосовуватись рій ударних БпЛА). У даному випадку надсистемою може бути система комплексного вогневого ураження противника, метою якої є виявлення та ураження якомога більшої кількості цілей (об'єктів) противника. Також показники можуть бути часткові та узагальнені.

Залежно від змісту задачі показники ефективності можуть мати різну значущість. Із системи показників необхідно вибрати один або

кілька найважливіших, значення яких характеризують ступінь досягнення мети (у нашому випадку – ефективне ураження одиночних та нестационарних групових цілей роями БПЛА). Оскільки необхідно оцінити ефективність складної системи “рій БПЛА, що уражає нестационарні групові цілі”, слід використовувати систему з кількох показників. Варіант загальної класифікації показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА наведено на рис. 1.



**Рисунок 1.** Загальна класифікація показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА (варіант)

З урахуванням запропонованої класифікації показників ефективності (рис. 1) розглянемо варіант їхнього змісту, зважаючи на те, що найбільш суттєвими, з точки зору застосування роїв ударних БПЛА, є функціональні показники, які характеризують кінцеву мету – ураження нестационарних групових цілей противника. На рис. 1 також показано, що найбільш прийнятним інтегральним показником ефективності рою міг би стати один із функціональних показників, який би

узагальнював часткові показники як певну функцію (виявлення, розпізнавання, наведення та ураження) і відносно “об’єктивно” характеризував ефективність конкретного рою за конкретних умов обстановки. Проте, залежно від цих умов, можуть бути корисними й інші показники ефективності.

Більш детально зміст показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА наведено нижче, з умовним розподілом на декілька груп:

функціональні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 1);

якісні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 2);

часові показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 3);

просторові показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 4);

експлуатаційні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 5);

воєнно-економічні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 6);

інтегральні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА (табл. 7).

У таблицях наведено пояснення та очікувані варіанти функціональних залежностей зазначених показників та інших додаткових параметрів, які впливатимуть на ефективність застосування роїв ударних БПЛА.

Також слід зауважити, що представлена на рис. 1 класифікація передбачає наявність кількісних та якісних показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА. Але такі показники не виділені в окремі групи, тому що кількісна або якісна інтерпретація є притаманною практично всім показникам, об’єднаним у наведених вище групах.

Залежно від змісту вирішуваних завдань, іноді кількісні показники ефективності можуть мати перевагу над якісними, оскільки вони базуються на чисельних даних, що робить їх менш суб’єктивними і більш точними. Вони можуть бути виміряні та перевірені, що мінімізує можливість хибних або неоднозначних інтерпретацій.

**Таблиця 1**

Функціональні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
1	2
$n$	Кількість виявлених одиночних об’єктів групової цілі
$n_{кр}$	Кількість виявлених критичних одиночних об’єктів групової цілі. Цей показник є необхідним, адже кількість одиночних об’єктів групової цілі може значно перевищувати кількість БПЛА у рою, що впливатиме на можливість завдання “критичного збитку” групової цілі $n_{кр} \leq n$
$P_e$	Ймовірність виявлення одиночного об’єкта групової цілі. Зазначена імовірність залежить від багатьох чинників (стан зовнішнього середовища, рівень маскуванню, кількість БПЛА рою, призначених для ведення розвідки, типів оптико-електронних засобів у цільовому навантаженні БПЛА, співвідношення можливого часу перебування БПЛА у польоті та часу, необхідного для огляду групової просторово розосередженої цілі тощо)
$P_e^z$	Ймовірність виявлення заданої кількості одиночних об’єктів групової цілі за заданий час $t$ $P_e^z = f(P_e, n^z, t), n^z \leq n$
$P_{e(n)}$	Ймовірність виявлення всіх одиночних об’єктів групової цілі $P_{e(n)} = f(P_e, n)$

1	2
$P_{e(n_{кр})}$	Ймовірність виявлення заданої кількості критичних одиночних об'єктів групової цілі $P_{e(n_{кр})} = f(P_e, n, n_{кр})$
$P_{eГЦ}$	Ймовірність виявлення однієї групової цілі за заданий час $t$ $P_{eГЦ} = f(P_e, n, N, t), N = 1$
$P_{eГЦ}^3$	Ймовірність виявлення заданої кількості групових цілей $N$ за заданий час $t$ $P_{eГЦ}^3 = f(P_e, n, N, t), N > 1$
$M_{e(n)}$	Математичне сподівання кількості виявлених одиночних об'єктів у складі групової цілі за заданий час $t$ $M_{e(n)} = f(P_e, n, t)$
$M_{e(n_{кр})}$	Математичне сподівання кількості виявлених критичних одиночних об'єктів у складі групової цілі за заданий час $t$ $M_{e(n_{кр})} = f(P_e, n_{кр}, t)$
<b>Показники ефективності розпізнавання групових цілей роями БпЛА</b>	
$P_p$	Ймовірність розпізнавання одиночного об'єкта групової цілі $P_p = f(P_e, \Psi)$ , де $\Psi$ – множина властивостей об'єкта та показників, які характеризують умови розпізнавання об'єктів (контрастність, освітленість, ступінь та якість маскування тощо)
$P_{pГЦ}$	Ймовірність розпізнавання групової цілі за заданий час $t$ $P_{pГЦ} = f(P_{e(n)}, P_p, n_{p(n_{кр})}, n, t)$
$n_{p(n_{кр})}$	Кількість розпізнаних критичних одиночних об'єктів групової цілі $n_{p(n_{кр})} = f(P_{e(n)}, P_p)$
$P_{p_{кр}}$	Ймовірність розпізнавання одного критичного одиночного об'єкта групової цілі $P_{p_{кр}} = f(P_{e(n_{кр})}, n_{кр})$
$M_{p(n)}$	Математичне сподівання кількості розпізнаних одиночних об'єктів у складі групової цілі за заданий час $t$ $M_{p(n)} = f(P_p, n, t)$
$M_{e(n_{кр})}$	Математичне сподівання кількості розпізнаних критичних одиночних об'єктів у складі групової цілі за заданий час $t$ $M_{p(n_{кр})} = f(P_p, n_{кр}, t)$
<b>Показники ефективності наведення роїв БпЛА</b>	
$P_{np}$	Ймовірність наведення рою БпЛА у район зосередження групової цілі $P_{np} = f(\Psi_{np}, P_{en}, P_{РЕП})$ , де $\Psi_{np}$ – множина властивостей (показників), які характеризують можливість апріорної обізнаності стосовно координат розташування групових цілей, умов виконання завдання та просторової досяжності групових цілей для роїв БпЛА $P_{en}$ – ймовірність подолання системи вогневої протидії противника; $P_{РЕП}$ – ймовірність подолання зони радіоелектронної протидії противника
$P_{nГЦ}$	Ймовірність наведення рою БпЛА на групову цілі $P_{nГЦ} = f(P_{np}, P_{eГЦ}, P_{pГЦ})$
$P_n$	Ймовірність наведення одного БпЛА зі складу рою на одиночний об'єкт групової цілі $P_n = f(P_{np}, P_e, P_p, n)$
<b>Показники ефективності ураження групових цілей роями БпЛА</b>	
$n_y$	Кількість уражених одиночних об'єктів групової цілі $n_y = f(P_y)$
$P_y$	Ймовірність ураження одиночного об'єкта групової цілі $P_y = f(P_{np}, P_e, P_p, P_n, r_y)$ , де $r_y$ – радіус зони ураження одного ударного БпЛА (залежить від типу та потужності бойової частини)
$P_{y_{кр}}$	Ймовірність ураження критичного одиночного об'єкта групової цілі $P_{y_{кр}} = f(P_{np}, P_e, n_{кр}, P_{p_{кр}})$

1	2
$P_{y(n_{кр})}^3$	Ймовірність ураження достатньої кількості критичних одиночних об'єктів ( $n_{кр}^3$ ) для виведення з ладу групової цілі $P_{y(n_{кр})}^3 = f(n, n_{кр}, n_{кр}^3, P_{np}, P_{y_{кр}}), n \geq n_{кр} \geq n_{кр}^3$
$M_{y(n)}$	Математичне сподівання кількості уражених одиночних об'єктів групової цілі $M_{y(n)} = f(n, P_{np}, P_{\sigma}, P_p, P_y)$
$M_{y_{ГЦ}}$	Математичне сподівання кількості уражених (виведених з ладу) групових цілей $M_{y_{ГЦ}} = \sum_i M_{y_{ГЦ_i}} = f(N_{ГЦ_i}, P_{np_i}, P_{\sigma_i}, P_{pi}, P_{y_i}), i = \overline{1, N}$ , де $i$ – тип групової цілі. Зазначений показник має аналог. Зокрема, в наукових публікаціях зустрічається такий показник, як математичне сподівання числа успішного виконаних бойових завдань. У його основі лежить ймовірність виконання одного бойового завдання, що виконується декількома БПЛА: $P_I = K_{oc} K_n P_{\sigma} P_{виявл} P_p P_c P_{ni} Q P_{nz} P_{\sigma z} (P_{nz})$ , де $K_{oc}$ – коефіцієнт, що характеризує готовність особового складу до виконання бойових завдань; $K_n$ – коефіцієнт, що враховує природні фактори: лісистість, рельєф місцевості, дорожні умови, хмарність, вітер, туман та ін.; $P_{\sigma}$ – ймовірність безвідмовної роботи (надійність застосування) БПЛА; $P_{виявл}$ – ймовірність виявлення об'єкта розвідки; $P_p$ – ймовірність розпізнавання об'єкта розвідки; $P_c$ – ймовірність прихованого функціонування БПЛА (його не виявлення); $P_{ni}$ – ймовірність передавання інформації на пункт управління; $Q$ – ймовірність неураження БПЛА засобами ППО противника; $P_{nz}$ – ймовірність успішного зайняття позиційного району (вчасність пуску БПЛА, не ураження підрозділу на шляху висування); $P_{\sigma z} (P_{nz})$ – ймовірність виконання завдання з визначеного позиційного району (не ураження підрозділу в позиційному районі за час виконання БПЛА польотного завдання) Показники ефективності комплексного виконання роями БПЛА бойових завдань (з виконанням усіх функцій – виявлення, розпізнавання, наведення та ураження групових цілей)
$P_{БЗ}^3$	Ймовірність виконання заданої кількості бойових завдань з ураження групових цілей ( $N^3$ ) роєм БПЛА $P_{БЗ}^3 = f(P_{\sigma_{ГЦ}}, P_{p_{ГЦ}}, P_{np_i}, P_{n_{ГЦ}}, P_{y(n_{кр})}^3, P_n, n_i, n_{БПЛА})$ за умови $n_{БПЛА} \gg \sum_{i=1}^{N^3} n_i$ , де $n_{БПЛА}$ – кількість БПЛА у рою; $P_n$ – ймовірність подолання роєм БПЛА зони вогневої та невогневої протидії противника
$P_{БЗ1}(t)$	Ймовірність виконання роєм БПЛА одного бойового завдання (з ураження однієї групової цілі) за заданий час $P_{БЗ1}(t) = f(P_{\sigma_{ГЦ}}, P_{p_{ГЦ}}, P_{n_{ГЦ}}, P_{y(n_{кр})}^3)$

У табл. 1 можна побачити, що показники доволі повно охоплюють функції, які виконуються роями БПЛА на різних етапах бойового застосування. Останні два показники і характеризують ефективність комплексного виконання роями

БПЛА бойових завдань, тому вони також належать до групи інтегральних показників ефективності, які мають практичну значущість на рівні угруповань військ (сил) під час планування ураження групових нестационарних цілей роями ударних БПЛА.

Таблиця 2

Якісні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
1	2
S	Ступінь самоорганізації рою БПЛА під час виконання бойового завдання. Цей показник є комплексним і може характеризувати здатність рою самостійно (без участі оператора) виконувати часткові завдання на маршруті польоту, розпізнавати поточні загрози, ідентифікувати групові цілі та їхні окремі елементи, оцінювати пріоритети ураження, здійснювати реконфігурацію рою у разі втрати частини БПЛА в умовах протидії противника. За певним набором критеріїв цей показник може задаватись деякою якісною шкалою (наприклад, шкалою Уея, Харрінгтона або Сааті)

1	2
z	Ступінь стійкості до зовнішніх впливів. Цей показник пов'язаний із попереднім і характеризує здатність рою БПЛА функціонувати ефективно, навіть за умов виходу з ладу (втрати) частини БПЛА зі складу рою. Стійкість має забезпечуватись за умов: децентралізованого управління БПЛА; наявності стійкого зв'язку та обміну інформацією між БПЛА, що дозволяє їм оперативно адаптуватися до зміни умов у реальному часі; розподілення завдань (функцій) між однаковими багатофункціональними БПЛА рою, що робить його стійким до втрат окремих БПЛА; алгоритмів адаптації до змін умов обстановки (завдань, перешкод, маршрутів тощо)
$Y_{ep}$	Якість виявлення групової цілі та її розпізнавання. Така якість залежить від типу сенсорів БПЛА рою, алгоритмів оброблення даних, часу реакції та координації інформації, отриманої з різних джерел (сенсорів БПЛА). Зазвичай основними сенсорами роїв БПЛА є оптико-електронні засоби, а якість виявлення цілей залежатиме від їхньої видимості, яка залежить від часу спостереження, ракурсу спостереження, освітленості та фонового контрасту об'єкта спостереження

У табл. 2 продемонстровано, що за своїм змістом запропоновані показники характеризують не кінцевий ефект застосування роїв ударних БПЛА, а характерні властивості цих роїв з акцентуванням на їхній якісній інтерпретації. Такі показники можуть використовуватись як додаткові під час планування бойового застосування роїв ударних БПЛА.

Таблиця 3

Часові показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
$M_t$	Математичне сподівання середнього часу виявлення типових одиночних об'єктів у складі групової цілі $M_t = \frac{1}{n} \sum_i t_i, i \in \mathbb{N},$ <p>де <math>t_i</math> – час виявлення типового <math>i</math>-го одиночного об'єкта у складі групової цілі.                      Відповідно до класичного визначення математичного сподівання показник відображає середнє значення часу виявлення типового <math>i</math>-го одиночного об'єкта нестационарної групової цілі. Також цей показник одночасно належить до групи як функціональних (відображають рівень виконання функції виявлення об'єктів), так і часових показників. Подібний показник можна використовувати й для часу розпізнавання (ураження) одиночних об'єктів у складі групової цілі.</p>
$M_{гц}$	Математичне сподівання середнього часу виявлення типових групових цілей $M_{гц} = f(t_{гц_j}, J) = \frac{1}{J} \sum_j t_{гц_j}, J \geq 1,$ <p>де <math>t_{гц_j}</math> – час виявлення типової <math>j</math>-ої нестационарної групової цілі.                      Показник відображає середнє значення часу виявлення типових <math>j</math>-их нестационарних групових цілей <math>j = \overline{1, J}</math>.                      Подібний показник можна використовувати й для часу розпізнавання (ураження) типових групових цілей.</p>
$t_{бз}$	Час виконання роєм БПЛА бойового завдання з виявлення розпізнавання та ураження визначеного типу групової цілі $t_{бз} = t_0 + t_n + (t_о + t_p + t_y)$ , <p>де <math>t_0, t_n</math> – відповідно час підготовки рою до вильоту та час польоту до району виконання бойового завдання.</p>
$M_{ібз}$	Математичне сподівання середнього часу виконання бойового завдання з виявлення розпізнавання та ураження визначеного типу групової цілі

Таблиця 4

Просторові показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
1	2
$L_{ypч}$	Глибина застосування роїв ударних БПЛА $L_{ypч} = f(D_3, D_6)$ , <p>де <math>D_3, D_6</math> – відповідно дальність застосування БПЛА і відстань базування підрозділу ударних БПЛА від лінії зіткнення військ</p>

1	2
$k_{si}$	<p>Коефіцієнт зони виконання бойових завдань роєм ударних БПЛА</p> <p>Значення цього коефіцієнта може бути описано <math>S</math>-подібною функцією належності – мірою перетину площі необхідної зони виконання завдань (<math>S_0</math>) та частки площі цієї зони, яка перекривається <math>i</math>-ою зоною можливих дій рою БПЛА (<math>S_i^+</math>) і відповідно до їх нечіткого співвідношення він може бути визначений за виразом:</p> $k_{si} = \mu(\Omega_{S_0} \cap \Omega_{S_i}) = \begin{cases} 0, & \Omega_{S_0} \cap \Omega_{S_i} = \emptyset, \\ 0 < S_i^+ / S_0 < 1, & \Omega_{S_0} \subseteq \Omega_{S_i}, \\ 1, & \Omega_{S_i} \subset \Omega_{S_0}, \end{cases}$ <p>де <math>\Omega_{S^*}</math> – область простору площею <math>S^*</math>, яка перекривається зоною можливих дій рою БПЛА.</p>

Таблиця 5

Експлуатаційні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
$k_{tr}$	<p>Коефіцієнт технічної готовності БПЛА до виконання бойового завдання у складі рою</p> $k_{tr} = f(t_\phi, t_\Sigma),$ <p>де <math>t_\phi, t_\Sigma</math> – відповідно час безвідмовного функціонування БПЛА та сумарного часу безвідмовного функціонування й відновлення</p>
$k_r$	<p>Коефіцієнт готовності рою БПЛА до виконання бойового завдання</p> $k_r(t) = f(n_r(t), n_{БПЛА}),$ <p>де <math>n_r(t)</math> – відповідно кількість БПЛА у рою, які будуть готовими до бойового застосування на момент часу <math>t</math></p>
$P_\phi$	Ймовірність безвідмовного функціонування одного БПЛА у рою $P_\phi = f(t_\Sigma)$

Таблиця 6

Воєнно-економічні показники ефективності застосування рою ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
$Q$	<p>Співвідношення вартості загальної кількості витрачених ударних БПЛА до загальної вартості знищених одиночних об'єктів групової цілі</p> $Q = \frac{\sum_i n_i \cdot c_i}{\sum_j N_j \cdot C_j}, i, j \in \mathbb{N}$
$\delta n$	<p>Відносна кількість витрачених ударних БПЛА для виведення з ладу (ураження) групової цілі</p> $\delta n = \frac{\sum_i n_i}{\sum_j (n_{крj}^3)}$

Таблиця 7

Інтегральні показники ефективності застосування роїв ударних БПЛА

Позначення показника	Назва (зміст) показника, пояснення та очікувана функціональна залежність
1	2
$M_{БП}$	<p>Математичне сподівання кількості виконаних завдань щодо викриття бойового потенціалу угруповання противника. Зазначений показник використовується у методиці оцінювання ефективності застосування розвідувально-ударних безпілотної авіаційних комплексів у складі розвідувально-ударної системи в операції оперативно-тактичного угруповання військ (сил). Зазначений показник може бути використано у випадку оцінювання ефективності виявлення та ураження багатьох об'єктів угруповання противника. Він відображає співвідношення математичного сподівання кількості виконаних завдань щодо викриття (знищення) об'єктів противника (<math>M</math>) до загальної кількості об'єктів противника у зоні відповідальності (<math>J</math>) з урахуванням бойового потенціалу одиночного об'єкта противника (<math>\omega_j</math>), визначення якого зазвичай є складною проблемою.</p> $M_{БП} = f(M, J, \omega_j)$



1	2
$M_{з\text{ГЦ}}$	<p>Математичне сподівання кількості знищених групових цілей роєм БПЛА у зоні відповідальності</p> $M_{з\text{ГЦ}} = f\left(\Omega_{\text{до}}, N_{\text{ГЦ}}, P_{y(\text{кр})}^3\right).$ <p>Показник має сенс як для оцінювання ефективності одного рою БПЛА, так і для окремого бойового завдання, яке виконується одним чи декількома роями ударних БПЛА</p>
$\delta_{\text{БП}}$	<p>Відносне зниження бойового потенціалу угруповання противника шляхом ураження групових цілей роями БПЛА</p> $\delta_{\text{БП}} = \frac{W(N_{\text{ГЦ}})}{W_{\Sigma}},$ <p>де <math>W_{\Sigma}</math> – загальний бойовий потенціал угруповання противника;  <math>W(N_{\text{ГЦ}})</math> – частка знищеного бойового потенціалу угруповання противника шляхом знищення групових цілей роями БПЛА.                      Показник може застосовуватись, якщо розглядається застосування роїв БПЛА в масштабах угруповання військ</p>
$\delta M$	<p>Відносне математичне сподівання кількості знищених групових цілей у зоні відповідальності рою БПЛА</p> $\delta M = \frac{\sum_i M_{y\text{ГЦ}i}}{\sum_j N_{\text{ГЦ}j}}$

### Обговорення

Вибір показників ефективності роїв ударних безпілотної літальних апаратів (БПЛА) є важливим етапом у процесі планування їх застосування або аналізу (прогнозування) результатів виконання ними комплексу завдань щодо виявлення (розвідки) одиночних та групових цілей, спостереження за ними, розпізнавання їх за певними групами ознак, оцінювання пріоритетності цілей, наведення (самонаведення) на них, ураження та оцінювання наслідків застосування. Правильний вибір показників дозволяє оцінити успішність рою та ефективність виконання поставлених завдань, а підхід до вибору цих показників залежить від конкретизації розв'язуваної роєм задачі – глобальної або часткової. Вибір показників здійснюється особою, яка ухвалюватиме рішення відповідно до власного досвіду, наявної інформації щодо можливостей підрозділів ударних БПЛА, умов обстановки, оцінки потенційних об'єктів (цілей) ураження. У будь-якому разі, до основних етапів вибору показників ефективності застосування роїв ударних БПЛА належать:

визначення мети застосування рою ударних БПЛА. Оскільки мета може бути різною (від виявлення, спостереження, цілевказання і до безпосереднього ураження одиночних об'єктів у складі групової цілі або загалом групових цілей), показники ефективності можуть обиратись з наведеного переліку функціональних показників (табл. 1), які характеризують відповідні етапи застосування роїв БПЛА (виявлення, розпізнавання, наведення, ураження тощо). При цьому слід обирати показники, які стосуються дій рою БПЛА проти одиночних об'єктів або проти групових цілей;

аналіз основних параметрів рою ударних БПЛА, який буде застосовуватись. Цей етап є складовою оцінювання обстановки, зокрема оцінювання

можливостей своїх сил і засобів. На цьому етапі важливо оцінити (знати) характеристики та функціональність кожного одиночного БПЛА, а також колективних можливостей всього рою. Зокрема, важливо враховувати такі показники, як дальність польоту, цільове навантаження, тривалість автономної роботи, здатність до самоорганізації та можливості стійкої комунікації між БПЛА рою в умовах відсутності зв'язку з оператором та впливів з боку противника;

збирання даних та аналіз обстановки. Цей етап передбачає оцінювання зовнішніх умов застосування роїв БПЛА у реальних операціях (умови обстановки, оцінювання характеристик потенційних маршрутів польоту, оцінювання характеристик потенційних об'єктів ураження тощо). Отримані на цьому етапі характеристики прямо не вказують на ефективність застосування роїв БПЛА, але є важливими параметрами для визначення показників такої ефективності та додатково дозволяють оцінити досяжність визначеної мети;

вибір ключових показників ефективності застосування рою ударних БПЛА. Показники мають відповідати меті оцінювання, тобто відповідати на питання: що оцінюється – кінцевий результат або певні аспекти застосування роїв БПЛА.

У разі необхідності оцінювання можливості досягнення визначеної мети або реалістичності виконання визначених завдань ключовими слід вважати показники, які характеризують часові та просторові можливості роїв БПЛА (див. табл. 3–4). При цьому важливо враховувати розміри зони відповідальності, просторове розміщення потенційних об'єктів (цілей) ураження, їхню досяжність для роїв БПЛА та часові показники (потрібний час для виконання завдання від моменту його отримання), можливу тривалість операції,

середній час виконання типових завдань з ураження типових одиночних об'єктів або групових цілей.

Якщо необхідно оцінити співвідношення ефекту та вартості застосування роїв БпЛА, логічно буде використовувати типові військово-економічні показники, низку яких наведено у табл. 6. Застосування таких показників сприятиме вибору більш раціональних (з точки зору витрати ресурсів) стратегій застосування роїв БпЛА або формуванню більш обґрунтованих замовлень щодо постачання БпЛА певних типів для виконання прогнозованих бойових завдань.

У разі необхідності оцінити кінцевий результат застосування роїв БпЛА слід скористатись комплексними показниками ефективності, які виражають наприклад, кількість або математичне сподівання кількості уражених цілей (об'єктів), а у разі наявності часових обмежень – математичне сподівання кількості уражених за визначений час об'єктів (цілей) або кількості виконаних бойових завдань (див. табл. 7).

Дотримання зазначених етапів, які наразі може бути уточнено, дозволить забезпечити комплексний підхід до оцінювання ефективності бойового застосування роїв ударних БпЛА (як порівняно нової форми ведення бойових дій), що сприятиме оптимізації тактики такого застосування, і підвищити ймовірність успішного виконання ними бойових завдань.

Наведений у цій статті структурований перелік показників ефективності, їхній загальний формалізований опис не є сталим і в подальшому може уточнюватись із набуттям досвіду, розширенням масштабів застосування роїв ударних БпЛА у бойових умовах, а також можливою появою певних особливостей їх бойового застосування. Більшість запропонованих показників сформульовано у вигляді функціональних залежностей від певних груп ключових параметрів, взаємозв'язок яких потребує подальшої деталізації у розроблених надалі математичних моделях. Залежно від ситуації запропоновані показники ефективності надалі можуть коригуватись залежно від специфіки обстановки, в якій застосовуватимуться (або будуть експлуатуватись) рої ударних БпЛА, а також масштабів.

Оскільки остаточних варіантів формування роїв ударних БпЛА нині немає, у подальшому показники ефективності може бути уточнено для випадків застосування однорідних роїв або роїв БпЛА з різними функціями. Також важливим напрямом досліджень слід вважати обґрунтування критеріїв ефективності застосування роїв БпЛА.

Отже, постійний аналіз і оптимізація системи показників оцінювання ефективності сприятимуть розвитку методології оцінювання ефективності роїв БпЛА, що дасть можливість досягти кращих результатів у майбутніх операціях.

### Висновки

Таким чином, у статті вирішено актуальне завдання, яке стосується вибору показників оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА для ураження нестационарних групових цілей. Запропоновано варіант загальної класифікації показників ефективності з умовним їх розподілом на декілька груп, наведено пояснення та очікувані варіанти функціональних залежностей зазначених

показників та інших додаткових параметрів, які впливатимуть на ефективність застосування роїв ударних БпЛА. Наведені показники ефективності може бути використано під час формування моделей оцінювання ефективності застосування роїв ударних БпЛА. Водночас, представлений перелік показників не є вичерпним і може коригуватись залежно від змісту виконуваних завдань та обсягу доступних вихідних даних. Оскільки остаточних варіантів формування роїв ударних БпЛА нині немає, у подальшому показники ефективності може бути уточнено для випадків застосування онорідних роїв або роїв БпЛА з різними функціями. Також важливими напрямками досліджень слід вважати:

обґрунтування критеріїв ефективності застосування роїв БпЛА;

розроблення математичних моделей ураження нестационарних неоднорідних групових цілей однорідними та неоднорідними роями БпЛА;

пошук способів розв'язання задач кластеризації та класифікації об'єктів (цілей) ураження із застосуванням методів та алгоритмів штучного інтелекту, а саме нейронних мереж;

розв'язання задачі оптимального розподілу ударних БпЛА по об'єктах нестационарної неоднорідної групової цілі з урахуванням їхньої пріоритетності, а також оцінювання ефективності роєвого застосування БпЛА.

Матеріали, що подані у статті, можуть бути корисними науковим та науково-педагогічним працівникам у галузі математичного моделювання складних систем воєнного призначення, а також здобувачам вищої освіти (курсантам, студентам, слухачам та ад'юнктам), які вивчають зазначені питання.

### Список використаних джерел

1. Kharchenko O. V., Artushin L. M., Kononov O. A. Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles. *Зб. наук. пр. ДНДІА*. 2022. № 18 (25). С. 7–13. DOI: 10.54858/dndia.2022-18-1.
2. Мосов С. П. Рої дронів військового призначення: реальність та перспективи. *Зб. наук. пр. Центру воєнно-стратегічних досліджень Нац. ун-ту оборони України*. 2024. № 1(80). С. 77–86.
3. Горбулін В. П., Мосов С. П. Рої дронів – кульмінація дронізації воєн. *Вісн. НАН України*. 2024. № 3. С. 3–11.
4. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні. Розпорядження КМ України від 2.12.2020 № 1556-р. Ред. від 29.12.2021, підстава – 1787-2021-р. URL: <http://surf.li/lhdyuf>.
5. Про нарощування спроможностей сил оборони: Указ Президента України від 06.02.2024 № 51/2024. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625> (дата звернення 10.10.2024).
6. Воєнно-історичний опис російсько-української війни. У 63 Вип. 18: серпень 2023 р. МО України, Апарат Головнокомандувача ЗС України, ГШ ЗС України та Центр досліджень воєнної історії ЗС України. Київ. 2023. 204 с.
7. Шовкошитний І. І., Василенко О. А. Проблемні питання роєвого застосування ударних безпілотних літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. *Наук. журн. Нац. ун-ту оборони України*. Київ. 2023. Т. 48. № 3. С. 27–34.
8. Гусак Ю. А., Василенко О. А. Кластеризація та класифікація ударних безпілотних літальних апаратів на основі нейронних мереж. *Повітряна міць України*. 2024. 1 (6). С. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-141-152>.
9. Оснащений штучним інтелектом та долає ПЕБ: як працює новий український дрон. URL: <http://surf.li/oivqnx2> (дата звернення: 10.09.2024).

10. В Україні розробляють технологію “рою дронів”. URL: [surl.li/fgtwn](http://surl.li/fgtwn) (дата звернення: 10.09.2024).
11. Василенко О. А. Застосування роїв ударних безпілотних літальних апаратів підрозділами збройних сил провідних держав світу. Global science: prospects and innovations. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2024. Pp. 118–121. URL: <http://surl.li/cnmoze>
12. Ярошенко Я. В., Герасименко В. В., Коротін С. М., Мартинюк О. Р. Класифікація завдань спільного бойового порядку пілотованої та безпілотної авіації в операціях. Повітряна міць України. ІА та ППО НУОУ. 2021. № 1. С. 41–46.
13. Романченко І. С., Загорка О. М., Бутенко С. Г., Дейнега О. В. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітними цілями (оцінка можливостей, тенденції розвитку засобів протиповітряної оборони). Моногр. Житомир: “Полісся”, 2011. 344 с.
14. Шустов Л. Н. Комплексы радиоэлектронной борьбы авиации вооруженных сил и их эксплуатация / Л. Н. Шустов, И. Н. Гончаров. Москва: ВВИА, 1980. 475 с.
15. Комиссаров Ю. А. Основы радиоэлектронного противодействия в ВВС / Ю. А. Комиссаров, П. А. Лимонов, К. К. Полянский и др. Киев: КВИАУ ВВС, 1970. 474 с.
16. Матюшенко, О. Г., Тристан, А. В. Групове застосування безпілотних літальних апаратів у місіях з пошуку та впливу на наземний об’єкт. Повітряна міць України. 2021. 1(1). 94–96. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-94-96>
17. Коваль В. В., Артюшин Л. М., Семон Б. Й., Лобанов А. А., Герасименко В. В. Підходи до формулювання стратегії управління спільними бойовими порядками пілотованої та безпілотної авіації. Наука і оборона. 2021. № 4. С. 34–43.
18. Артюшин Л. М., Лобанов А. А., Герасименко В. В. Математична модель побудови бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2021. № 2 (41). С. 23–30. DOI: [10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30).
19. Пулеко І. В., Андрєєв О. В., Дубина О. Ф., Чумакевич А. С. Модель руху безпілотних літальних апаратів на основі алгебри дуальних кватерніонів. Житомирський військ. ін-т ім. С. П. Корольова. Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. 2022. Вип. 23. С. 52–61.
20. Мажара І. П., Тимочко О. І. Модель процесу управління повітряним рухом на основі нейронних нечітких мереж. Наука і техніка ПС ЗС України. 2021. № 2 (43). С. 61–65.
21. Самоїленко О. В., Богославець С. О., Стещенко П. М., Наусенко Б. Ю. Особливості керування спільними бойовими порядками безпілотних і пілотованих літальних апаратів. Київ: Держ. наук.-досл. ін-т авіації, 2021. Вип. 17 (24). С. 45–49.
22. Мартинюк О. Р. Модель узгодженого руху групи безпілотних літальних апаратів. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2016. № 1. С. 78–81.
23. Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan, Muhammad Shafiq. Motion planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches. Aeronautics - New Advances. 2022. 244 с. URL: <https://cutt.ly/bwvukUH7>. (дата звернення: 17.09.2024).
24. Абдураїмов Т. З. Алгоритм глибинного аналізу даних для задачі класифікації на основі штучного бджолиного рою. Магістр. Дис. ... 123. Київ. НТУ України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”. 2020. 107 с.
25. Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об’єктів. Дис. ... канд. техн. наук. 05.13.06. Харків. ХНУПС. 2020. 192 с.
26. Сахопотинов Г. А., Сыркин И. С. Проблемы практического применения роевого интеллекта и построение устойчивых управляемых групп роботов. URL: <https://cutt.ly/0wvujXN3>. (дата звернення: 10.09.2024).
27. Пашенко Т. П., Микусь С. А., Солонников В. Г. та ін. Методи моделювання бойових дій військ (сил). навч. посіб. Київ: НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2021. 272 с.
28. Ачкасов А. Є., Лушкін В. А., Охріменко В. М., Воронкова Т. Б. Теорія систем і системний аналіз: навч. посіб. Харків: ХНУМГ, 2014. 167 с.
29. Месарович М., Мако Д., Такахага І. Теорія ієрархічних багатоуровневих систем. Москва: Мир, 1973. 312 с.
30. Згуровський М. З. Системний аналіз. Проблеми, методологія, приложения. Моногр. Ін-т прикладного системного аналізу НАН України. [2-е изд., перераб. и доп.]. Киев: Наук. думка, 2011. 726 с.
31. Майзер Х., Ейджин Н., Тролл Р. Исследование операций. В 2-х т. Под ред. Дж. Моудера, С. Элмгагри. Москва: Мир, 1981. Т. 1. 712 с.

<sup>1</sup>**Ihor Shovkoshytnyi** (PhD of Military Sciences, Senior Research Scientist)  
<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

<sup>2</sup>**Olha Vasylenko**  
<https://orcid.org/0000-0003-2633-0131>

<sup>1</sup>*The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup>*Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

## SELECTION OF INDICATORS FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF SWARMS OF STRIKING UNMANNED AERIAL VEHICLES TO DEFEAT NON-STATIONARY GROUP TARGETS

*The experience of the Russian-Ukrainian war shows that one of the promising areas for improving the effectiveness of combat operations in modern conditions is the transition to group (swarm) use of unmanned systems for reconnaissance and strike missions. In view of this, the article is devoted to solving an urgent scientific task, which is to select indicators for assessing the effectiveness of the use of swarms of striking unmanned aerial vehicles to defeat non-stationary group targets.*

*The publication highlights the tasks of swarms of attack UAVs, which are divided into combat tasks and tasks of supporting (ensuring) combat operations. Each of them needs to be evaluated in order to make informed decisions and adjust strategies for the swarm use of strike UAVs, which will perform a complex of tasks to detect, recognize, and defeat both single objects and non-stationary group targets of the enemy. Such an assessment requires the availability of appropriate performance indicators. In view of this, the article presents the main requirements for such indicators, proposes a variant of the*

general classification of efficiency indicators for the use of swarms of attack UAVs with their conditional division into several groups, the main of which are: functional, temporal, spatial, partial, integral, operational, military and economic. Explanations and expected variants of functional dependencies of these indicators and other additional parameters that will affect the effectiveness of the use of swarms of attack UAVs are also provided.

The study used general scientific methods (analysis, comparison), certain provisions of the systemic approach, probability theory and system reliability theory, as well as military-economic analysis. The proposed efficiency indicators can be used in the formation of models for assessing the effectiveness of the use of swarms of attack UAVs.

**Keywords:** strike unmanned aerial vehicles, swarm, swarm technology, effectiveness of use, efficiency indicators, defeat of non-stationary group targets.

## References

1. Kharchenko O. V., Artushyn L. M., Kononov O. A. Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles. *Zb. nauk. pr. DNDIA*. 2022. № 18 (25). S. 7–13. DOI: 10.54858/dndia.2022-18-1.
2. Mosov S. P. Roinnia droniv viiskovoho pryznachennia: realii ta perspektyvy. *Zb. nauk. pr. Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Nats. un-tu oborony Ukrainy*. 2024. № 1(80). S. 77–86.
3. Horbulin V. P., Mosov S. P. Roi droniv – kulminatsiia dronizatsii voien. *Visn. NAN Ukrainy*. 2024. № 3. S. 3–11.
4. Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku shtuchnoho intelektu v Ukraini. *Rozporiadzhennia KM Ukrainy vid 2.12.2020 № 1556-r*. Red. vid 29.12.2021, pidstava – 1787-2021-r. URL: <http://surl.li/lhdyyf>. (data zvernennia 10.10.2024)
5. Pro naroshchuvannia spromozhnosti syl oborony: Ukaz Prezidenta Ukrainy vid 06.02.2024 № 51/2024. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/512024-49625> (data zvernennia 10.10.2024)
6. Voienno-istorychni opys rosiisko-ukrainskoi viiny. U 63 Vyp. 18: serpen 2023 r. MO Ukrainy, Aparat Holovnokomanduvacha ZS Ukrainy, HSh ZS Ukrainy ta Tsentri doslidzhen voiennoi istorii ZS Ukrainy. Kyiv. 2023. 204 s.
7. Shovkoshytni I. I., Vasylenko O. A. Problemni pytannia roiovoho zastosuvannia udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ. Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony. *Nauk. zhurn. Nats. un-tu oborony Ukrainy*. Kyiv. 2023. T. 48. № 3. S. 27–34.
8. Husak Yu. A., Vasylenko O. A. Klasteryzatsiia ta klasyfikatsiia udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi neironnykh merezh. *Povitriana mits Ukrainy*. 2024. 1 (6). S. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-141-152>.
9. Osnashchenyi shtuchnym intelektom ta dolaiya REB: yak pratsiuie novyi ukrainskyi dron. URL: <http://surl.li/oivqnx2> (data zvernennia 10.10.2024)
10. V Ukraini rozrobliaiut tekhnologiiu “roiui droniv”. URL: [surl.li/fgtlwn](http://surl.li/fgtlwn) (data zvernennia 10.10.2024)
11. Vasylenko O. A. Zastosuvannia roiv udarnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ pidrozdilamy zbroinykh syl providnykh derzhav svitu. *Global science: prospects and innovations. Proceedings of the 9th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. Liverpool, United Kingdom*. 2024. Pp. 118–121. URL: <http://surl.li/cnmoze>
12. Iaroshenko Ya. V., Herasymenko V. V., Korotin S. M., Martyniuk O. P. Klasyfikatsiia zavdan spilnogo boiovoho poriadku pilotovanoi ta bezpilotnoi aviatsii v operatsiakh. *Povitriana mits Ukrainy*. IA ta PPO NUOU. 2021. № 1. S. 41–46.
13. Romanchenko I. S., Zahorka O. M., Butenko S. H., Deineha O. V. Teoriia i praktyka borotby z maloroznimymy nyzkolitnymy tsiliamy (otsinka mozhlyvosti, tendentsii rozvytku zasobiv protypovitrianoi oborony). *Monohr. Zhytomyr: «Polissia»*, 2011. 344 s.
14. Shustov L. N. Kompleksy radyoelektronnoi borby avyatsyiv voozhuzhennykh syl y kh ekspluatatsiia / L. N. Shustov, Y. N. Honcharov. Moskva: VVYA, 1980. 475 s.
15. Komysarov Yu. A. Osnovy radyoelektronnoho protyvoeistviia v VVS / Yu. A. Komysarov, P. A. Lymonov, K. K. Polianskyi y dr. Kyev: KVYAU VVS, 1970. 474 s.
16. Matiushchenko, O. H., Trystan, A. V. Hrupove zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ u misiakh z poshuku ta vplyvu na nazemnyi obiekt. *Povitriana mits Ukrainy*. 2021. 1(1). 94–96. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2021-1-1-94-96>
17. Koval V. V., Artiushyn L. M., Semon B. Y., Lobanov A. A., Herasymenko V. V. Pidkhoty do formuluvannia stratehii upravlinnia spilnymy boiovymy poriadkamy pilotovanoi ta bezpilotnoi aviatsii. *Nauka i oborona*. 2021. № 4. S. 34–43.
18. Artiushyn L. M., Lobanov A. A., Herasymenko V. V. Matematychna model pobudovy boiovoho poriadku spilnoi aviatsiinoi hrupy pilotovanoi ta bezpilotnoi aviatsii. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*. 2021. № 2 (41). S. 23–30. DOI: 10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30.
19. Puleko I. V., Andriev O. V., Dubyna O. F., Chumakevych A. S. Model rukhu bezpilotnykh litalnykh aparativ na osnovi aliebray dualnykh kvaternioniv. *Zhytomyrskyi viisk. in-t im. S. P. Korolova. Problemy stvorennia, vyprovovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system*. 2022. Vyp. 23. S. 52–61.
20. Mazhara I. P., Tymochko O. I. Model protsesu upravlinnia povitrianykh rukhom na osnovi neironnykh nechitkykh merezh. *Nauka i tekhnika PS ZS Ukrainy*. 2021. № 2 (43). S. 61–65.
21. Samoilenko O. V., Bohoslavets S. O., Steshenko P. M., Nausenko B. Yu. Osoblyvosti keruvannia spilnymy boiovymy poriadkamy bezpilotnykh i pilotovanykh litalnykh aparativ. *Kyiv: Derzh. nauk.-dosl. in-t aviatsii*, 2021. Vyp. 17 (24). S. 45–49.
22. Martyniuk O. R. Model uzghodzhenooho rukhu hrupy bezpilotnykh litalnykh aparativ. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*. 2016. № 1. S. 78–81.
23. Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan, Muhammad Shafiq. Motion planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches. *Aeronautics - New Advances*. 2022. 244 s. URL: <https://cutt.ly/bwvukUH7>. (data zvernennia: 17.09.2024).
24. Abduraimov T. Z. Alhorytm hlybynnoho analizu danykh dlia zadachi klasyfikatsii na osnovi shtuchnoho bdzholynoho roiu. *Mahist. Dys. ... 123*. Kyiv. NTU Ukrainy “Kyivskyi politekhnichnyi instytut im. Ihoria Sikorskoho”. 2020. 107 s.
25. Bereznyi A. O. Metody ta informatsiina tekhnologiiia avtomatyzovanoho planuvannia marshrutiv polotiv bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia pidvyshchennia efektyvnosti poshuku obektiv. *Dys. ... kand. tekhn. nauk*. 05.13.06. Kharkiv. KhNUPS. 2020. 192 s.
26. Sakhopotynov H. A., Syrkin Y. S. Problemy praktycheskoho prymerennia roevoho yntellekta y postroyeniye ustoiyvnykh upravliaemykh hrupp robotov. URL: <https://cutt.ly/0wvujXN3>. (data zvernennia: 10.09.2024).
27. Pashchenko T. P., Mykus S. A., Solonnikov V. H. ta in. Metody modeliuvannia boiovykh dii viisk (syl). *navch. posib*. Kyiv: NUOU im. Ivana Cherniakhovskoho, 2021. 272 s.
28. Achkasov A. Ye., Lushkin V. A., Okhrimenko V. M., Voronkova T. B. Teoriia system i systemnyi analiz: navch. posib. *Kharkiv: KhNUMH*, 2014. 167 s.
29. Mesarovykh M., Mako D., Takakura Y. *Teoriia yerarkhycheskykh mnohourovnevnykh system*. Moskva: Myr, 1973. 312 s.
30. Zhurovskyi M. Z. Systemnyi analiz. *Problemy, metodolohiia, prylozheniia*. *Monohr. Yn-t prykladnoho systemnoho analyza NAN Ukrainy*. [2-e yzd., pererab. y dop.]. Kyev: Nauk. dumka, 2011. 726 s.
31. Maizer Kh., Eidzhyn N., Troll R. *Yssledovanye operatsyi*. V 2- kh t. Pod red. Dzh. Moudera, S. Elmahraby. Moskva: Myr, 1981. T. 1. 712 s.