

АФТАНАЗІВ ІВАН

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-3484-7966>e-mail: ivan.aftanaziv@gmail.com**ШЕВЧУК ЛІЛІЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: shev.lili2206@gmail.com**СТРОГАН ОРИСЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-1790-6736>e-mail: orysia.i.strohan@lpnu.ua**КОРЕНДІЙ ВІТАЛІЙ**

Національний університет «Львівська політехніка» м. Львів, Україна

<http://orcid.org/0000-0002-6025-3013>vitalii.m.korendii@lpnu.ua**СТРУТИНСЬКА ЛЕСЯ**

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-0401-5475>e-mail: lesia.r.strutyńska@lpnu.ua

КІНЕМАТИЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЯК ЗАСІБ УТОЧНЕННЯ КООРДИНАТ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті запропоновано задіяти до процесів уточнення координат літальних апаратів математичний апарат кінематичного проектування. Запропонована схема просторового розташування групи безпілотних дронів-камікадзе, зорієнтованих на виявлення і ліквідацію ворожих розвідувальних та ударних безпілотних літальних апаратів. Вперше запропоновані математичні залежності, які дозволяють оснащеному програмами штучного інтелекту дрону-оператору (умовному керівнику групи дронів-перехоплювачів) по чергово спрямовувати на ліквідацію ворожих дронів найближче розташовані до них у повітряному просторі дрони-ліквідатори.

На принциповій схемі використання кінематичного проектування для ліквідації ворожих безпілотних літальних апаратів продемонстровано механізм оптимізації вибору черговості атак дронів-ліквідаторів на ворожі об'єкти. Послідовність дій та розрахунків і порівняльного аналізу проілюстровано на запропонованій типовій блок-схемі залучення штучного інтелекту та механізмів кінематичного проектування для ліквідації ворожих диверсійних безпілотних літальних апаратів.

На прикладі групи (так званого «рою») дронів-ліквідаторів, очолюваної дроном-оператором, із конкретними заданими числовими значеннями параметрів їх просторових переміщень та змінних координат проілюстровано можливості та переваги запропонованого методу визначення координат ворожих літальних апаратів. Основна із цих переваг - вищий відсоток ймовірності та точності визначення координат ворожих літальних апаратів, а отже, і можливої їх ліквідації.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, дрон, боєзаряд, ворог, ліквідація, координати, кінематичне проектування, розрахунок.

AFTANAZIV IVAN, SHEVCHUK LILIA, STROHAN ORYSA, KORENDIY VITALIY STRUTYNSKA LESYA
Lviv Polytechnic National University

KINEMATIC DESIGN AS A MEANS OF SPECIFICATION OF AIRCRAFT COORDINATES

In the article, it is proposed to use the mathematical apparatus of kinematic design in the processes of specifying the coordinates of aircraft. The proposed scheme of the spatial arrangement of a group of unmanned kamikaze drones, aimed at detecting and eliminating enemy reconnaissance and attack unmanned aerial vehicles. Mathematical dependencies are proposed for the first time, which allow a drone operator equipped with artificial intelligence programs (the conditional leader of a group of interceptor drones) to alternately direct the liquidator drones located closest to them in the airspace to eliminate enemy drones.

The schematic diagram of the use of kinematic design for the elimination of enemy unmanned aerial vehicles demonstrates the mechanism for optimizing the sequence of attacks by liquidator drones on enemy objects. The sequence of actions and calculations and comparative analysis is illustrated on the proposed typical block diagram of the involvement of artificial intelligence and kinematic design mechanisms for the elimination of enemy subversive unmanned aerial vehicles.

The possibilities and advantages of the proposed method of determining the coordinates of enemy aircraft are illustrated on the example of a group (so-called "swarm") of liquidator drones, led by a drone-operator, with specific numerical values of the parameters of their spatial movements and variable coordinates. The main of these advantages is a higher percentage of the probability and accuracy of determining the coordinates of enemy aircraft, and therefore, their possible elimination.

Key words: unmanned aerial vehicle, drone, warhead, enemy, liquidation, coordinates, kinematic design, calculation.

Вступ

Невпинне використання ворогуючою стороною під час воєнних подій на території України розвідувальних та диверсійно-ударних безпілотних літальних апаратів завдає значної шкоди не лише військовим захисникам держави, а і мирним її громадянам. Особливо дошкульними, при цьому, для населення

постали одночасно запущені чисельні групи безпілотних дронів типу Shahed 131/136 та подібних їм модифікацій. Їх специфіка полягає і у тому, що окрім чисельних зарубіжних поставок цих дронів, росія ще і налагодила їх серійний випуск на власних підприємствах. Тому немає жодного сумніву, що ворог їх активно використовуватиме до останньої миті провадження ним бойових дій.

Здавалось би незначні обсяги боєзаряду та швидкості просторових переміщень не мали б становити труднощів для збройних сил України (ЗСУ) в протистоянні Shahed 131/136. Проте переважно обрані ворогом нічні години польотів дронів, незначні висоти просторових переміщень і обумовлені цим складнощі їх виявлення над пересічними місцевостями призводить до того, що ліквідувати ці дрони доводиться уже на заключній стадії їх польоту. І тоді уламки збитих стрілецькою зброєю чи ракетами малого радіусу дії ворожих дронів, падаючи на будівлі та вулиці атакованих населених пунктів, завдають мешканцям не лише значних матеріальних збитків, а і становлять неабияку загрозу їх життю.

Тому доречним видається вдосконалення методів та способів протистояння не лише силами ЗСУ, а і силами територіальних оборонних угруповань населених пунктів масованим груповим атакам безпілотних літальних апаратів, у тому числі і дронів моделі Shahed 131/136 та їх можливих модифікацій типу «Герань» тощо.

Аналіз літературних джерел

Із певною часткою правдоподібності можна стверджувати, що як в медицині головне – вірно встановити діагноз хвороби пацієнта, так і у військовій справі найвагоміше – своєчасно виявити противника та обрати доступний засіб для його знищення. Саме у такому подвійному контексті і сприймалися у минулому наукові дослідження в галузі протистояння ворожим літальним апаратам:

- одна частина досліджень зосереджувалась на забезпеченні максимально-досяжної точності виявлення та визначення координат ворожих літальних апаратів [1–3];
- інша спрямовувалась на вдосконалення методів та озброєння ураження та знищення цих цілей [4–6].

Слід відзначити, що за два останні воєнні роки обидва ці напрями протистоянь ворожій безпілотній літальній техніці мали доволі відчутні свої досягнення [7, 8]. Так активно розвинулись і повсемірно використовуються, особливо на передових позиціях та передньому краї протистоянь, колись екзотичні, а тепер незамінні засоби радіо-електронної боротьби (РЕБ) [9–11]. Фактично навколо усіх більш-менш чисельних населених пунктів та вагомих об'єктів військово-промислового комплексу і міської інфраструктури сформовані мобільні пересувні опорні пункти, що оснащені крупнокаліберною стрілецькою зброєю для ураження ворожих літальних апаратів [3, 6] тощо. Розроблені методики уточнення координат ворожих безпілотників, що завдяки застосуванню математичних апаратів та методів кінематичного проектування спроможні з точністю до 0,5÷1,0 метра визначити точні координати ворожих літальних апаратів [4, 5].

Однак реальний відсоток виявлених та знищених ворожих диверсійно-ударних дронів усе ще в життєвих реаліях не перевищує 65÷70% [1, 6, 12]. Тобто до 30–35 ворожих дронів із сотні спрямованих на мирні населенні пункти мають реальні шанси зі своїми 40–45 кілограмовими боєзарядами «впасти на голови» мирного населення чи пошкодити важливі об'єкти інфраструктури.

І головна першопричина цьому - неспроможність наших наявних засобів ураження із 100-відсотковою гарантією вражати ворожі безпілотники. І враховуючи незначну для росії вартість Shahed-ів, вони активно їх використовуватимуть не тільки як руйнівну зброю ураження, а і як зброю психологічного тиску на населення, як дієву зброю гібридної війни.

Тому доречними і надалі залишаються дослідження, спрямовані на вдосконалення методів протистоянь ворожим літальним апаратам, що спроможні підвищувати точність визначення їх перемінних у часі координат. А також на вдосконалення наявних засобів і обладнання виявлення та ураження ворожих літальних апаратів та пошук нових більш дієвих засобів знищення ворожої техніки та зброї.

Основні результати дослідження

Досвід далекосхідних фахівців-піротехніків, які досягнули визначних результатів у керуванні багаточисельними роями літаючих у нічному небі дронів-ліхтариків, що формують своїм світлом не лише буквенні чи ієрогліфічні написи, а і ілюзію рухомих казкових тварин та птахів, переконливо свідчить про унікальні можливості штучного інтелекту в одночасному дистанційному керуванні параметрами просторових рухів та переміщень великої кількості окремих об'єктів. Підсвідомо напрашується висновок про доцільність запозичення таких навиків та технічних можливостей для протистояння воїнами України масованим атакам розвідувальних та диверсійно-ударних ворожих безпілотних літальних апаратів. І передумовою можливості реалізації такої ідеї фактично постає лише дві технологічні проблеми, що потребують інженерного рішення. Перша з них - це спроможність оснащення власних дронів-ліквідаторів дистанційно керованими боєзарядами певної руйнівної сили та маси, друга - надати оснащеному відповідним сучасним програмним забезпеченням дрону-оператору чітко означену послідовність програмних дій, спрямованих на вибір у конкретній ситуації дрона-ліквідатора, який буде спрямований ним на ураження ворожого літального апарату.

Перша із цих задач доволі успішно вирішена - так звані дрони-камікадзе уже доволі давно ліквідувають наземну військову техніку ворога, а також його бліндажі, укриття та окопи із особовим складом супротивника. А от із вирішенням другої проблематики - навчити дрон-оператор безпомилково обирати свій конкретний дрон-ліквідатор та спрямовувати саме його на ураження певної цілі - поки що виникають певні ускладнення. Саме на основі цих міркувань і сформульована мета даного дослідження.

Мета дослідження – розробка на основі математичного апарату кінематичного проектування методики та послідовності оптимального вибору засобами штучного інтелекту із групи наявних, конкретного дрона-ліквідатора для спрямування його на ураження ворожого літального апарату.

У задачі дослідження входили:

- оптимізація чисельності групи дронів-ліквідаторів, достатньої для гарантованого ураження ворожого літального апарату;
- оптимізація просторового розташування дронів-ліквідаторів для забезпечення мінімальних часових затрат на їх спрямування на виконання бойового завдання;
- створення математичних залежностей для оптимізації вибору спрямованих на ураження цілі дронів-ліквідаторів.

Аналіз запропонованої схеми ліквідації ворожих безпілотних літальних апаратів передбачає декілька почергових етапів її успішного застосування.

На першому з цих етапів завчасно піднятому у повітряний простір так званому «рою» або «групі перехоплення» оснащених боєзарядами дронів-ліквідаторів подають інформацію та команду про наближення до ділянки території їх патрулювання ворожих літальних апаратів. Оснащений переносним радаром дрона-оператор при цьому відслідковує кількість ворожих об'єктів. Визначаючи зміну їх часових координат прораховує їх параметри руху, тобто висоту лету, швидкість та пришвидшення. На підставі цих даних командний пункт прораховує траєкторію лету кожного із виявлених ворожих літальних апаратів та орієнтовний час їх прибуття на контрольовану даною групою дронів-ліквідаторів ділянку території.

Дана інформація від дрона-оператора невпинно поступає на пульт командного пункту. Тут оператори її проаналізують і приймають рішення щодо можливих варіантів та засобів ліквідації ворожих літальних апаратів, а також про вибір конкретного із наявних захисних опорних пунктів для безпосереднього здійснення цієї ліквідації [6].

На другому етапі, отримавши рішення командного пункту про застосування саме даної групи дронів-ліквідаторів для знищення ворожих літальних апаратів, користуючись програмним забезпеченням дрона-оператора, розраховують координати та час прибуття кожного із ворожих літальних апаратів на контрольовану ділянку повітряного простору.

На третьому етапі визначають кількість необхідних для знищення ворожих літальних апаратів дронів-ліквідаторів. Для цього використовують математичну залежність

$$N_{0-l} = N_e(n_{л.а} + k_d),$$

де N_{0-l} - необхідна кількість дронів-ліквідаторів;

N_e - кількість груп ворожих літальних апаратів;

$n_{л.а}$ - кількість ворожих літальних апаратів у кожній із груп;

k_d - кількість дронів-ліквідаторів для дубляжу невдалих спроб знищення ворожих літальних апаратів.

На четвертому етапі, володіючи по кожному із ворожих літальних апаратів інформацією про їх координати, висоту лету та час прибуття у завчасно прораховану точку ліквідації, розташовують поблизу точки ліквідації трійку розміщених на вершині трикутника дронів-ліквідаторів. Перший з них розташовують в точці можливої ліквідації ворожого літального апарату (чи поблизу неї), два інші - віддаляють від першого на віддаль, що перевищує радіус розсіювання осколків від вибуху боєзарядів дрона-ліквідатора та ворожого літального апарату, тобто приблизно на віддалі 50-100 м.

На заключному п'ятому етапі, при максимальному наближенні ворожого літального апарату до призначеної точки його ліквідації, дистанційно подається команда на вибух боєзаряду дрона-ліквідатора. Якщо під час цього вибуху здетонує та вибухає і боєзаряд ворожого літального апарату або руйнуються його окремі вузли чи деталі і він неспроможний продовжити свій політ та падає на землю, то ліквідаційну операцію вважають успішно завершеною. Якщо ж вибух боєзаряду дрона-ліквідатора не досягнув бажаного ефекту і ворожий літальний апарат продовжує свій політ, на нього, перерахувавши координати, спрямовують наступний дрон-ліквідатор, за ним ще один і т.д. Так може продовжуватися поки або ворожий літальний апарат не буде знищено, або ж поки він не покине повітряний простір даного опорного пункту. У подальшому можуть бути застосовані більш ефективні засоби ураження літальних об'єктів, наприклад, ракети малої дальності класу «земля-повітря».

На рис.1 відображена блок-схема послідовності дій та розрахунків при застосуванні математичного апарату кінематичного проектування та складових штучного інтелекту для знищення ворожих літальних апаратів із застосуванням групи дронів-ліквідаторів.

Найвідповідальнішими моментами використання запропонованої схеми знищення ворожих літальних апаратів, незаперечно, є етап прорахунку точних координат просторового розташування ворожого об'єкту на мить часового проміжку його ліквідації та вибір дрона-оператором із групи можливих варіантів просторового розташування дронів-ліквідаторів найближчого до завчасно прорахованої точки ураження. Володіючи на завершальному етапі лету ворожого літального апарату усіма параметрами його просторового переміщення, а саме визначеними радаром дрона-оператора та радіо-локаційною станцією командного пункту проміжними координатами, прорахованою комп'ютерними програмами траєкторію руху, координати зручної для ураження ворожого об'єкту точки траєкторії, а також час його прибуття у цю точку розрахувати не складно.

А от для вдалого вибору найближчого до точки ураження дрона-ліквідатора і спрямування його на знищення ворожого об'єкту доречним є застосування комп'ютерних програм із елементами спроможності

здійснення певного аналізу можливих варіантів вибору, тобто із елементами так званого «штучного інтелекту». При цьому вихідними даними для цього аналізу можуть бути використані результати уточнення координат просторового розташування усіх рухомих в просторі із своїми параметрами руху учасників ліквідації ворожого літального апарату. А саме безпосередньо самого ворожого об'єкту, групи дронів-ліквідаторів, дрона-оператора. І самих лише координат миттєвого розташування у просторі цих складових операції ліквідації ворожого об'єкта тут недостатньо. Для забезпечення вищого рівня точності добре було б володіти даними про зміну віддалей між призначеною групою дронів-ліквідаторів та ворожим об'єктом, що підлягає ліквідації.

У цій ситуації доречно скористатися схемою та математичним апаратом кінематичного проектування, яка відображена на рис. 2. Відчутною перевагою кінематичного проектування є те, що усі без винятку складові процесу проектування, тобто об'єкти проектування, спостерігач, проектуючі промені та картинна площина, можуть водночас переміщатися у просторі із незалежними параметрами руху [3, 6].

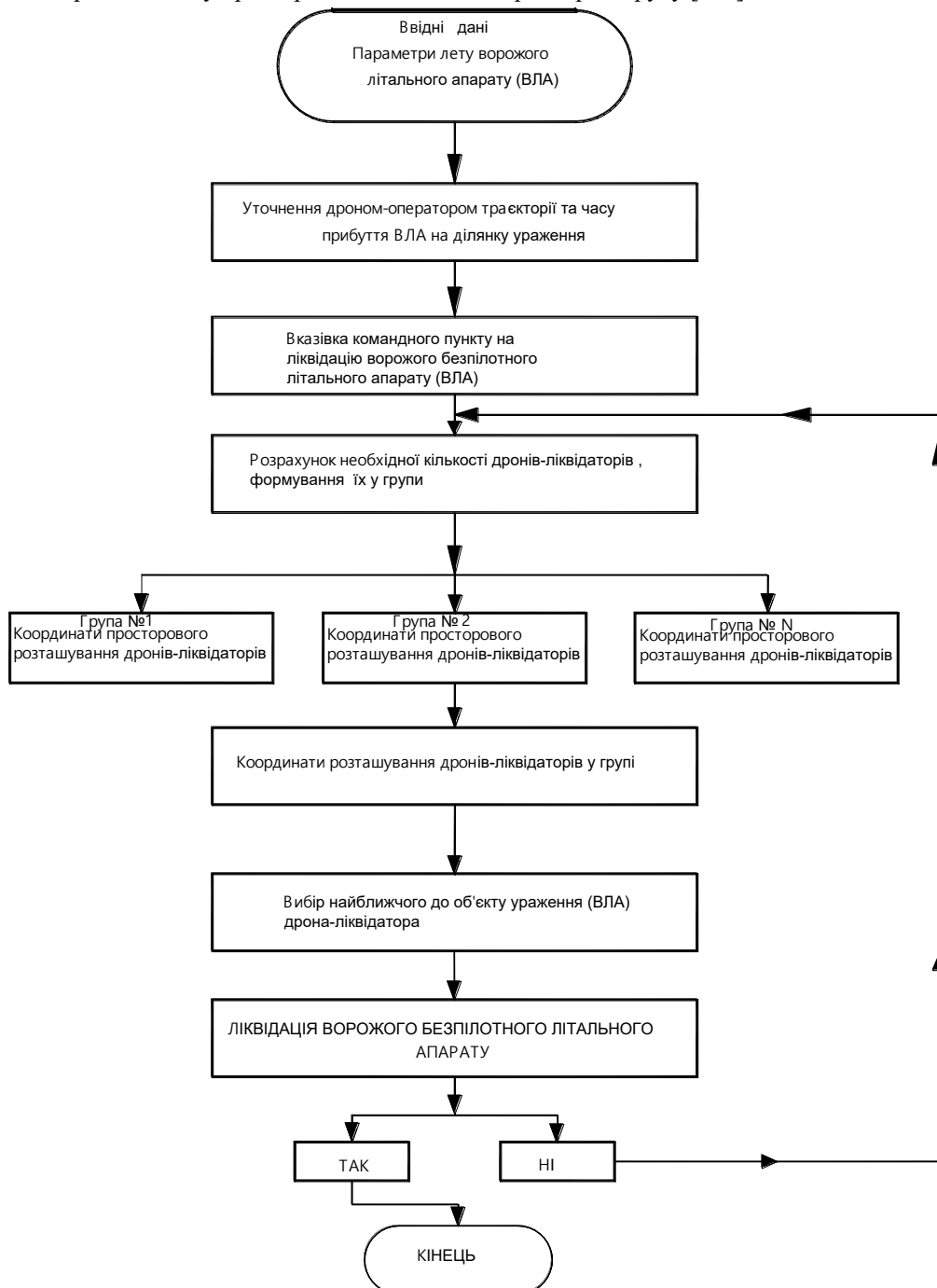


Рис. 1. Блок-схема дій та розрахунків при використанні кінематичного проектування для знищення ворожих літальних апаратів із застосуванням групи дронів-ліквідаторів
Джерело: розроблено авторами

На рис. 2 відображена принципова схема визначення віддалей від дронів-ліквідаторів до рухомого ворожого літального апарату засобами кінематичного проектування. Основними елементами цієї схеми є дрон-оператор 1 із встановленим на ньому переносним радаром 2 з системою зв'язку із наземним командним пунктом (на рис. не відображено), група із трьох дронів-ліквідаторів 3 (№ 1, № 2 та № 3) кожен з яких оснащений

дистанційно керованим боезарядом 4, ворожий літальний апарат 5, картинна площина α , що позначена позицією 6, та проєктуючі промені 7, спрямовані від дрона-оператора до кожного із дронів-ліквідаторів та ворожого об'єкту.

Основним завданням кінематичного проєктування, у даному випадку, є визначення та порівняння між собою віддалей від дронів-ліквідаторів 3 до ворожого літального апарату 5 з метою прийняття рішення щодо спрямування найближчого з них на ураження ворожого об'єкту. Послідовність розрахунків та аналізу включає декілька етапів.

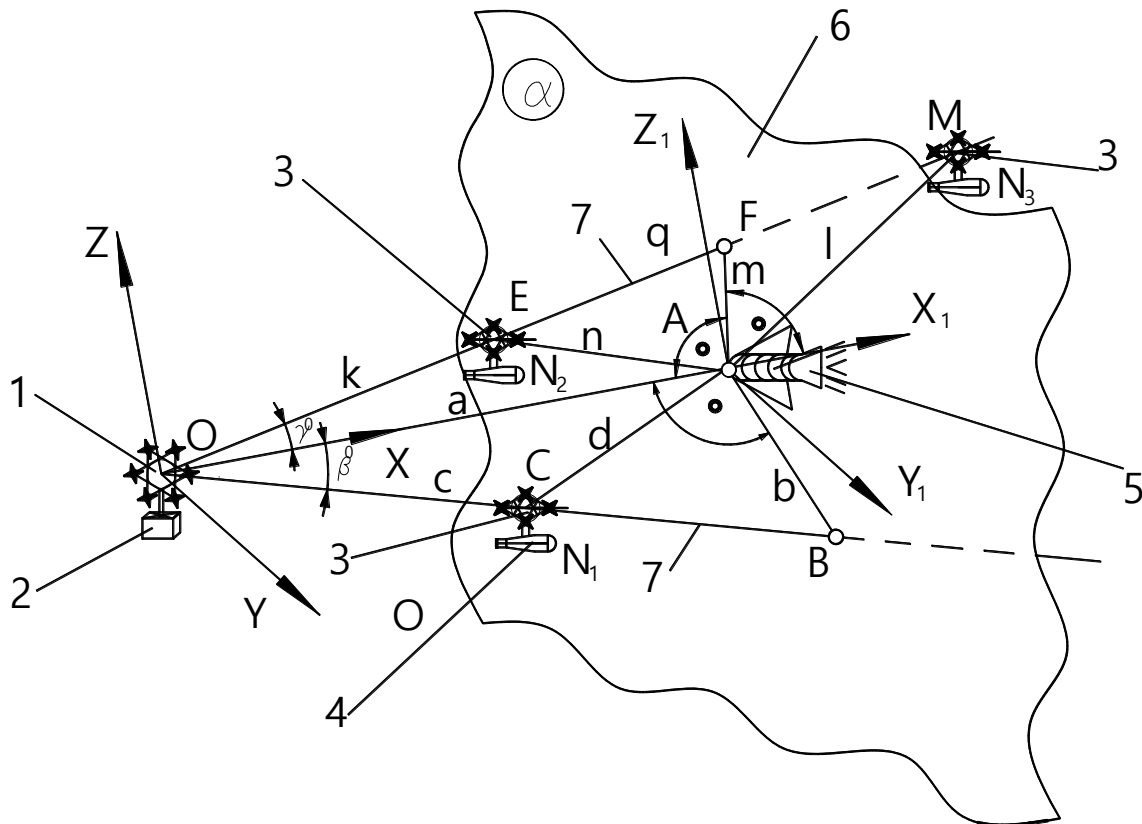


Рис. 2. Принципова схема визначення координат рухомого ворожого літального апарату засобами кінематичного проєктування. Джерело: розроблено авторами

На першому етапі при входженні ворожого літального апарату 5 в зону ураження і фіксації його радаром 2 дрона-оператора 1 фіксують їх миттєві координати та визначають віддаль a між ними.

На наступному другому етапі на дроні-операторі 1 уявно розташовують декартову ортогональну трьохвимірну систему координат, спрямовуючи її вісь x від початку системи координат (точка O на дроні-операторі) в напрямку ворожого літального апарату 5 (точка A). Вісь Y спрямовують від початку координат (точка O) перпендикулярно осі X і паралельно лінії горизонту, вісь Z - спрямовують вгору перпендикулярно площині XOY .

На третьому етапі в точці A на осі X , де розташований на дану мить часу ворожий літальний апарат 5, уявно запроваджують картинну площину α (позиція 6), яка перпендикулярна осі x і віддалена від дрона-оператора 1 на віддаль a . Тут же в запровадженій системі координат перевизначають координати усіх літальних об'єктів та спрямовують на них від дрона-оператора 1 уявні проєктуючі промені 7, що проходять через точку O початку координат та кожен із літальних об'єктів.

На четвертому етапі визначають координати точок перетину кожного із проєктуючих променів з картинною площиною α як точок перетину прямих ліній, що проходять через початок координат (точка $O(0;0;0)$) та вже відомі точки $C(x_c; y_c; z_c)$, $M(x_D; y_D; z_D)$ і $E(x_E; y_E; z_E)$, у яких розташовані дрони-ліквідатори, із площиною α , яка перпендикулярна осі X і віддалена від початку координат на віддаль a . Володіючи координатами точок $F(x_F; y_F; z_F)$ та $B(x_B; y_B; z_B)$ перетину проєктуючих променів 7, що проходять через дрони-ліквідатори 3 із картинною площиною α , визначають їх віддаленість від точки A , у якій розташований ворожий об'єкт 5. Оскільки точки перетину F та B лежать у картинній площині α , то з'єднуючі їх лінії із точкою A розміщення ворожого об'єкту є перпендикулярними до осі X оскільки $X \perp \alpha$.

Для більшої наочності на схемі рис. 2 дрони-ліквідатори №1 (точка C) та №3 (точка E) розташовані перед картинною площиною α між нею та початком координат, а дрон-ліквідатор №2 (точка M) - за картинною площиною α . До того ж дрони-ліквідатори №2 та №3 розташовані на лінії спільного проєктуючого променя 7 і мають спільну точку F його перетину із картинною площиною α .

На п'ятому заключному етапі рішенням трикутників, утворених проєктуючими променями 7 та їх проєкціями на картинну площину α , розраховують віддалі від дронів-ліквідаторів 3 до ворожого літального

апарату 5. Порівнюючи віддаленості кожного із трьох наявних в групі дронів-ліквідаторів до ворожого літального апарату і обравши найближчий до нього, саме цей дрон-ліквідатор спрямовують на ураження ворожого літального апарату. У випадку невдачі спрямовують на ліквідацію наступний дрон-ліквідатор, здійснивши необхідні перерахунки параметрів руху усіх «дієвих осіб» операції ліквідації ворожого об'єкта.

Специфічні особливості використання кінематичного проектування для уточнення координат рухомих у просторі об'єктів проілюстровано на прикладі.

Нехай завчасно підняті у повітряний простір дрон-оператор 1 (рис. 2) та дрони-ліквідатори 3 (№1, №2 та №3) виявили у контрольованій ними частині повітряного простору ворожий літальний апарат 5. Почерговими замірами координат та параметрів руху ворожого об'єкту було встановлено, що він рухається із сталою швидкістю $v=150 \text{ км/год} = 41,7 \text{ м/с}$ по прямолінійній траєкторії на сталій висоті в напрямку до осі Z системи координат командного пункту під кутом 45° до фронтальної (XOZ) та профільної (YOZ) площин проекцій його системи координат.

Припустимо, що на момент входження в контрольовану дроном-оператором зону ураження ворожий об'єкт володів координатами $A(1000;0;50)$, а завчасно підняті дрони №1 т. $C(480;50;21)$, №2 т. $E(450;50;20)$, №3 т. $M(541;0;41)$.

Необхідно визначити оптимальні координати точки ураження ворожого об'єкту, почерговість вибору дронів-ліквідаторів для його ураження та їх швидкість польоту для своєчасного прибуття в точку ураження.

Для успішної ліквідації ворожого об'єкту, перш за все, необхідно вдало розташувати в просторі дрони-ліквідатори щоб забезпечити їх прибуття в точки ураження за мінімально можливі часові проміжки. У випадку використання трьох дронів-ліквідаторів та прямолінійної траєкторії руху ворожого об'єкту оптимальним видається розташування дронів-ліквідаторів в площині утвореного ними трикутника, нахиленого під кутом $\beta=45^\circ$ до горизонтальної площини проекцій XOY та кутом $\gamma=45^\circ$ до прямої лінії, що відображає траєкторію руху ворожого об'єкту. Точкою ураження у цьому випадку доречно призначити точку перетину прямої лінії траєкторії руху ворожого об'єкту із точкою перетину медіан чи висот площини трикутника розташування дронів-ліквідаторів. Проте ця умова є лише рекомендаційною.

Запроваджують для дрона-оператора 1 власну систему ортогональних просторових координат із початком в точці $O(0;0;0)$ безпосередньо на дроні-операторі 1 та напрямку осі X по прямій лінії, що з'єднує дрон-оператор 1 із ворожим літальним апаратом 5 (рис. 2). Вісь Y цієї системи ортогональних координат перпендикулярна осі X і паралельна лінії горизонту, вісь Z – спрямована вгору перпендикулярно горизонтальній площині XOY . Специфічною особливістю цієї кінематичної системи координат є те, що як її облаштований на дроні-операторі 1 початок, так і прив'язані віссю X до ворожого об'єкту 5 взаємно перпендикулярні осі X , Y та Z , постійно знаходяться у просторовому русі. Разом з просторовим переміщенням кінематичної системи координат переміщається в просторі і постійно перпендикулярна осі X картинна площина α , що проходить через віддалену на віддаль a точку A_1 , у якій на даний момент часу розташований ворожий літальний апарат 5.

Припустимо, що на момент виявлення ворожого літального апарату 5 у нього в запровадженій системі відліку такі координати $A_1(1000;0;0)_M$. Його прибуття в зону ураження, де розташовані дрони-ліквідатори, при швидкості його руху 150 км/год відбудеться приблизно за 12 секунд. На цей момент в системі координат дрона-оператора 1 ворожий об'єкт 5 матиме координати $A(500;0;0)_M$, тут координату X_A визначено як зміну віддаленості ворожого літального апарату 5 від дрона-оператора 1 за $t=12 \text{ секунд}$ його польоту на швидкості $V_{л.-a.} = 150 \text{ км/год} = 41,7 \text{ м/с}$, тобто $X_A = X_{1A} - V_{л.-a.} \cdot t_1 = 1000 - 41,7 \cdot 12 = 500_M$.

Оскільки дрони-ліквідатори 3 віддалені від дрона-оператора 1 приблизно на 500_M , то координати ворожого літального апарату 5 $A(500;0;0)$ можуть сприйматися як координати першої із можливих точок ураження цього ворожого об'єкту. Залишається визначити який саме із трьох дронів-ліквідаторів 3 є найближчий до координат обраної точки ураження і із якою швидкістю він повинен бути спрямованим у цю точку ураження.

Для цього доречним є використання математичного апарату кінематичного проектування, принципова схема якого відображена на рис. 2. Перш за все, тут володіючи координатами точок просторового розташування дронів-ліквідаторів 3 т. $C(480;50;21)$, т. $E(450;50;20)$, т. $M(541;0;41)$, через початок координат $O(0;0;0)$ та ці точки уявно проводять проектуючи промені 7 у вигляді прямих ліній, що проходять через точки із відомими координатами.

Задають рівняння проектуючих променів 7 та рівняння картинної площини, яка у даному випадку проходить через точку $A(500;0;0)$ перпендикулярно осі X , і рішаючи систему цих рівнянь знаходять координати точок F та B перетину проектуючих променів 7 із картинною площиною 6.

Рішенням прямокутних трикутників, гіпотенузою яких є відрізок проектуючого променя 7 від його початку в точці $O(0;0;0)$ до точки перетину із картинною площиною 6, катетами - проекція цього відрізка на картинній площині та вісь X при прямому куті 90° між ними, визначають величину кута β або γ між віссю X та проектуючими променями. А рішенням рівносторонніх трикутників ΔAFO , ΔACO та ΔAMO , утворених сторонами, що з'єднують дрони-ліквідатори 3 із дроном-оператором 1 та ворожим літальним апаратом 5, а також цей апарат 5 із початком координат, використовуючи теорему косинусів, визначають шукані віддалі від кожного з дронів-ліквідаторів 3 до ворожого об'єкту 5. Порівнюють визначені віддалі між собою, обирають найменшу і, володіючи часом $t=12 \text{ с}$ прибуття ворожого літального апарату 5 в точку його ураження, визначають необхідну швидкість $V_{д.-л}$ обраного дрона-ліквідатора для своєчасного його прибуття в точку ураження ворожого об'єкту 5. Якщо розрахована швидкість дрона-ліквідатора 3 знаходиться в межах його допустимих технічних характеристик, то спрямовують його на ураження ворожого об'єкту 5. Якщо ж, згідно

розрахунків, вона перевищує технічні можливості обраного дрона-ліквідатора 3, задавши черговий часовий проміжок, наприклад $t_2=5c$, заново прораховують координати чергової можливої точки ураження ворожого об'єкту 5 і всі поетапні розрахунки повторюють у вище описаній послідовності.

У випадку одночасного застосування ворогом декількох ворожих літальних апаратів використовують одночасно декілька груп дронів-ліквідаторів, спрямовуючи кожен з них на траєкторію призначеного їй для ліквідації ворожого об'єкту.

У таблиці приведено дані прикладу розрахунків параметрів просторових переміщень групи дронів-ліквідаторів при перехопленні ними ворожого літального апарату.

Таблиця 1

Приклад розрахунку параметрів кінематичного проектування при ліквідації ворожих літальних апаратів дронами-камікадзе

№ з/п	Розрахункові параметри і математичні залежності їх визначення			
I	Ворожий літальний апарат:			
	- швидкість руху	$V_{л.-a.} = 150 \text{ км/год} = 41,7 \text{ м/с}$		
	- координати на момент входу в зону ураження	$A_1(1000; 0; 0)$		
	- координати в точці ураження	$A(500; 0; 0)$		
II	Параметри дрона-оператора та його системи координат			
	- швидкість руху	$V_{д.-o.} = (0; -15) \text{ км/год}$		
	- координати	$O(0; 0; 0)$		
	- рівняння картинної площини	$x = a = 500$		
III	Параметри дронів-ліквідаторів			
		№1 т.С	№2 т.Е	№3 т.М
	- швидкість руху	$V_{д.-л.} = (0; 20) \text{ км/год}$	$V_{д.-л.} = (0; 20) \text{ км/год}$	$V_{д.-л.} = (0; 20) \text{ км/год}$
	- координати	$m.C(480; 50; 21)$	$m.E(450; -50; 20)$	$m.M(541; 0; 41)$
	- віддалі до початку координат (до дрона-оператора)	$ OC = 483 \text{ м}$	$ E = 453,2 \text{ м}$	$ M = 542,7 \text{ м}$
IV	Параметри проєктуючих променів			
	- параметричне рівняння як прямої, що проходить через початок координат і точку з відомими координатами	$x = 480 \cdot t;$ $y = 50 \cdot t;$ $z = 21 \cdot t.$	$x = 450 \cdot t;$ $y = -50 \cdot t;$ $z = 20 \cdot t.$	$x = 541 \cdot t;$ $y = 0;$ $z = 41 \cdot t.$
	- кут нахилу до осі x	$6,4^\circ$	$6,6^\circ$	$4,5^\circ$
	- координати точки перетину із картинною площиною	$m.B(500; 52; 22)$	$m.N(500; -55,5; 22,2)$	$m.F(500; 0; 37,9)$
	- віддалі від точки перетину до ворожого літального апарату	$ BA = 56,45 \text{ м}$	$ NA = 59,8 \text{ м}$	$ FA = 37,9 \text{ м}$
V	Віддалі від дронів-ліквідаторів до ворожого об'єкту	$d = AC = c^2 + a^2 - 2c \cdot a \cdot \cos \gamma = 483^2 + 500^2 - 2 \cdot 483 \cdot 500 \cdot \cos 6,4^\circ = 57,8 \text{ м}$	$n = AE = k^2 + a^2 - 2k \cdot a \cdot \cos \beta = 453,2^2 + 500^2 - 2 \cdot 453,2 \cdot 500 \cdot \cos 6,6^\circ = 53,5 \text{ м}$	$l = AM = q^2 + a^2 - 2q \cdot a \cdot \cos \beta = 524,7^2 + 500^2 - 2 \cdot 524,7 \cdot 500 \cdot \cos 4,5^\circ = 58 \text{ м}$
	Необхідна швидкість для прибуття в точку ураження за проміжок часу Δt	$v_1 = \frac{d}{\Delta t} = \frac{57,8}{12} = 4,82 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 17,2 \frac{\text{км}}{\text{год}}$	$v_2 = \frac{n}{\Delta t} = \frac{73,5}{12} = 6,1 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 21,9 \frac{\text{км}}{\text{год}}$	$v_3 = \frac{l}{\Delta t} = \frac{58}{12} = 4,8 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 17,3 \frac{\text{км}}{\text{год}}$

Таким чином, приведені у таблиці результати розрахунків відображають, що за наявності у дронів-ліквідаторів координат їх просторового розташування № 1 т.С(480;50;21), № 2 т.Е(450;-50;20), №3 т.М(541;0;41) та обмеженні максимальної швидкості їх лету $V_{max}=20 \text{ км/год}$ на ураження ворожого безпілотного літального апарату можуть бути спрямовані лише дрон-ліквідатор №1 т.С із заданою йому швидкістю $V_1=17,2 \text{ м/с}$ та дрон-ліквідатор №3 М із швидкістю польоту $V_3=17,3 \text{ м/с}$. Кожен із них за час $\Delta t=12 \text{ с}$, впродовж якого ворожий об'єкт долітає до точки його ураження, спроможний своєчасно прибути у точку ураження і вибухом свого боезаряду ліквідувати ворожий безпілотний літальний апарат. На відміну від них дрону-ліквідатору № 2 т.Е це здійснити не вдасться через надмірну його віддаленість від точки ураження. Йому

для прибуття у цю точку знадобиться 13,1 с. Різниця становить лише 1,1 с, та за цей час ворожий об'єкт віддаляється від точки ураження вже на 46,2 метри і вибух боєзаряду шкоди йому не завдасть.

Порівняно із відомими способами визначення координат та параметрів руху літаючих на незначних висотах літальних апаратів перевагою описаного у цьому дослідженні є те, що він завдяки підняттю в повітряний простір на дроні-операторі радарові, спроможний у півтора-два рази збільшити радіус ділянки виявлення невпізнаних літальних апаратів. Більший радіус ділянки виявлення рухомого об'єкта забезпечує більше часу на визначення точніших координат та параметрів руху цього об'єкта. Особливо це актуально у часи воєнних протистоянь, коли подібні низькошвидкісні літальні апарати (дрони) активно застосовують для ураження як бойового особового складу та мирного населення, так і військової техніки та об'єктів інфраструктури. Важливо і те, що визначення і уточнення завдяки описаному методу точних координат ворожих БПЛА надає можливість застосування для їх ураження порівняно дешевших за ракети протиповітряної оборони дронів-камікадзе. До того ж і у нічний період доби, коли стрімко знижується ефективність стрілецького озброєння.

Є у даного методу визначення точних координат рухомих у повітряному просторі об'єктів і певні застереження у можливості його застосування у ненасну погоду при швидкостях вітрів понад 8–10 м/с та ще і у супроводі активних атмосферних опадів. Зрозуміло, що ні дроном-оператором, ні дронами-камікадзе тоді скористатися не вдасться. Однак, можна вважати, що наявні переваги вагоміші за недоліки, обумовлені не такими вже і частими для території України штормовими негодами.

Висновки

1. Результатами даного дослідження встановлена спроможність застосування порівняно маловартісних дронів-камікадзе для перехоплення і ураження ворожих безпілотних літальних апаратів типу Shahed-131/136. Ефективність застосування дронів-камікадзе переконливо доведено при їх використанні для ураження наземних цілей, а для ліквідації рухомих в повітряному просторі об'єктів їх застосування пропонується вперше.

2. Специфікою застосування групи дронів-камікадзе для ураження ворожих літальних апаратів є надважлива вимога до дистанційного підривання їх боєзаряду в строго визначені період часу та у точних до десятих долей метра завчасно визначених координат їх повітряного простору, де на момент вибуху боєзаряду повинен розташовуватися ворожий об'єкт. При порушенні будь-якої із цих двох передумов ворожий літальний апарат або не долетить до точки його ліквідації, або пролетить її і буде недосяжним для руйнівної дії вибуху боєзаряду дрона-ліквідатора.

3. Висока точність у визначенні як часового проміжку вибуху боєзаряду, так і просторових координат його здійснення обумовлюють потребу в більш точних, ніж радіо-електронні методи визначення і прогнозування параметрів руху та координат рухомих у просторі об'єктів. Таких методик, які опираючись на точні виміри параметрів та координат рухомих об'єктів у минулому, могли б прогнозувати з високою точністю ці показники у недалекому майбутньому. У даному випадку йдеться про прогнозування на підставі попередніх даних майбутніх координат ворожого літального апарату в точці його ураження і точний до сотих долей секунд час його прибуття туди.

4. Із можливих теоретичних методів розрахунків параметрів рухомих у повітряному просторі тіл одним із найбільш придатних для прогнозування майбутніх координат і параметрів руху є методика та супроводжуючий її математичний апарат так званого «кінематичного проектування». Даний метод кінематичного проектування надає можливість із високою точністю визначати координати рухомих у просторі твердих тіл при незалежному переміщенні в цьому просторі усіх об'єктів проектування, тобто спостерігачів, об'єктів проектування, картинної площини та проектуючих променів. Саме кінематичне проектування покладено в основу дослідженого в даній роботі методу ліквідації ворожих безпілотних літальних апаратів.

Література

1. Куценко В.В. Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distancemeasuring passive location method / В.В. Куценко, С.П. Коваленко, Д.Д. Добровольський. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2017. Вип 1. С. 82–84. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.

2. Лаврівський М. З., Тур Н. С. Використання безпілотних літальних апаратів в моніторингу надзвичайних ситуацій у лісовій місцевості. Науковий вісник НЛТУ України. 2015. Вип. 258. С. 353–359.

3. Svidrak I. G., Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strogan O. [Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection](#). Mathematical Modeling and Computing, -2022. Vol. 9, № 2. – P. 459–469.

4. Афтаназів І.С., Стоцько Р.З., Шевчук А.О., Стrogан О.І., Бойко О.О. Визначення координат та параметрів руху безпілотних літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. 2022. №3(71). С. 49–59.

5. Чернишев М. І., Куценко В. В. Оцінка точності визначення положення БПЛА різницево-далекомірним методом в рухомій системі пасивної радіолокації зенітних комплексів малої дальності. Системи озброєння і військова техніка, 2018. Вип. 2. С. 61–66.

6. Афтаназів І.С., Стоцько Р.З., Шевчук А.О., Стругинська Л.Р., Стrogан О.І., Бойко О.О. Захист населених пунктів від ударних та диверсійно-розвідувальних БПЛА. Системи озброєння і військова техніка. 2022. №1 (73). С.83-95, DOI:10.30748/soivt. 2023.73/10.

7. Pozdniakov Y.K., Tkachenko V.N., Korotkov V.V. Increase of accuracy of definition of coordinates by multi-position passive complexes on a basis of difference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions. *Radio electronics and Communications Systems*. 2014. Vol. 57. No. 9. P. 394.
8. Пічугін М. Ф., Носова Г.Д. [Збірник наукових праць ЖВІ НАУ. Випуск 3 -Аналіз тактики застосування підрозділів РЕБ у сучасних війнах та локальних збройних конфліктах](#). -К., 2010.
9. О. М. Семененко, Р. В. Бойко, Ю. Б. Добровольський, В. Л. Іванов, О. І. Кремешний. Контррадіоелектронна боротьба як складова частина радіоелектронної боротьби в Збройних Силах України // Системи озброєння і військова техніка. -2016. -Вип. 46. -С. 141-145. -ISSN 2518-1580.
10. McDermott, Roger N (September 2017). *Russia's Electronic Warfare Capabilities to 2025: Challenging NATO in the Electromagnetic Spectrum*. International Centre for Defence and Security. ISBN 978-9949-9972-0-6.
11. Jonas Kjellén (4 жовтня 2018). *Russian Electronic Warfare. The role of Electronic Warfare in the Russian Armed Forces (Звіт)*. Stockholm: FOI, Swedish Defence Research Agency. с. 105. FOI-R-4625-SE.
12. Кучеренко Ю. Ф., Науменко М. В., Кузнєцова М. Ю. Аналіз досвіду застосування безпілотних літальних апаратів та визначення напрямку їх подальшого розвитку при веденні мережецентричних операцій. Системи озброєння і військова техніка. 2018. № 1. С. 25–30. doi:10.30748/soivt.2018.53.03.

References

1. Kutsenko, V. V., Kovalenko, S. P., Dobrovolskyi, D. D. (2017). Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distancemeasuring passive location method. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 1, 82-84. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.17>.
2. Lavrivskiy, M. Z., Tur, N. Ye. (2015). The use of unmanned aerial vehicles in monitoring emergencies in forest areas. *Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine*, 258, 353–359.
3. Svidrak, I. G., Aftanaziv, I. S., Shevchuk, L. I., Strogan, O. (2022). Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. *Mathematical Modeling and Computing*, 9(2), 459–469.
4. Aftanaziv, I. S., Stotsko, R. Z., Shevchuk, A. O., Strogan, O. I., Boiko, O. O. (2022). Determination of coordinates and motion parameters of unmanned aerial vehicles [Vyznachennia koordynat ta parametriv rukhu bezpilotnykh litalnykh aparatI]. *Systems of Armament and Military Equipment*, (3)71, 49–59.
5. Chernyshov, M. I., Kutsenko, V. V. (2018). Assessment of the accuracy of determining the position of UAVs by the difference-distance method in a mobile passive radar system for short-range air defense systems [Otsinka tochnosti vyznachennia pozysii BpLA riznytsevo-viddalnym metodom v rukhomii systemi pasyvnoi radiolokatsii zenitnykh kompleksiv maloi dalnosti]. *Systems of Armament and Military Equipment*, (2), 61–66.
6. Aftanaziv, I. S., Stotsko, R. Z., Shevchuk, A. O., Strutynska, L. R., Strogan, O. I., Boiko, O. O. (2022). Protection of settlements from impact and reconnaissance UAVs. *Systems of Armament and Military Equipment*, (1)73, 83–95. <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.73/10>.
7. Pozdniakov, Y. K., Tkachenko, V. N., Korotkov, V. V. (2014). Increase of accuracy of definition of coordinates by multi-position passive complexes on a basis of difference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions. *Radio Electronics and Communications Systems*, 57(9), 394.
8. Pichuhin, M. F., Nosova, H. D. (2010). Analysis of the tactics of using EW units in modern wars and local armed conflicts. *Collection of Scientific Works of Zhytomyr Military Institute of NAU*, 3.
9. Semenenko, O. M., Boiko, R. V., Dobrovolskyi, Yu. B., Ivanov, V. L., Kremeshnyi, O. I. (2016). Counter-electronic warfare as a component of electronic warfare in the Armed Forces of Ukraine. *Systems of Armament and Military Equipment*, 46, 141-145. ISSN 2518-1580.
10. McDermott, R. N. (2017). *Russia's electronic warfare capabilities to 2025: Challenging NATO in the electromagnetic spectrum*. International Centre for Defence and Security. ISBN 978-9949-9972-0-6.
11. Kjellén, J. (2018). *Russian electronic warfare. The role of electronic warfare in the Russian armed forces*. FOI, Swedish Defence Research Agency, FOI-R-4625-SE.
12. Kucherenko, Yu. F., Naumenko, M. V., Kuznetsova, M. Yu. (2018). Analysis of the experience of using unmanned aerial vehicles and determining the direction of their further development in conducting network-centric operations. *Systems of Armament and Military Equipment*, (1), 25–30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.53.03>.