



І. С. Афтаназів, О. І. Строган, Л. І. Шевчук, Л. Р. Струтинська

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

УТОЧНЕННЯ КООРДИНАТ ВОРОЖИХ БПЛА ЗАСОБАМИ КІНЕМАТИЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Розглянуто і проаналізовано актуальне на час воєнних протистоянь на території України питання підвищення ефективності протиповітряної оборони військових угруповань та цивільних населених пунктів атакам ударних і ударно-розвідувальних ворожих безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Встановлено, що своєчасне виявлення та знищення ворожих дронів і БПЛА є важливою не тільки військовою, а й соціально-економічною проблематикою, успішне вирішення якої не терпить зволікання та відтермінування на повне і успішне завершення воєнних дій. Розроблена методика уточнення координат і траєкторії просторових переміщень БПЛА засобами кінематичного проектування дає змогу визначити їх миттєве розташування у просторі. Для цього було розроблено методику визначення координат, швидкостей та траєкторій просторових переміщень рухомих літальних апаратів на підставі теорії кінематичного проектування. Основою теоретико-експериментального дослідження були положення теорії відображення координат та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами нарисної геометрії при поєднанні класичного ортогонального проектування із динамічними особливостями кінематичного проектування. Розроблено принципову схему оптимального розміщення радіолокаційного пошукового устаткування для успішного виявлення ворожих БПЛА, а також представлено вперше створені математичні залежності для визначення параметрів їх просторових переміщень. Основним результатом дослідження є розроблення методики визначення точних координат, швидкостей та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами кінематичного проектування. Це дасть змогу підвищити ефективність виявлення ворожих ударних і диверсійно-розвідувальних безпілотних літальних апаратів, у т.ч. і дронів іранського виробництва моделі Shahed-136.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; дрон-перехоплювач; дрон-ліквідатор; радіолокаційна апаратура; озброєння; пошук; координати; ліквідація.

Вступ / Introduction

Шкода, але як Збройні сили України, так і підрозділи територіальної оборони виявилися недостатньо готовими до протистояння такому різновиду ворожої зброї як ударні та розвідувальні безпілотні літальні апарати (БПЛА). Причиною такої кризової ситуації постало очевидно те, що наявні радіолокаційні засоби протиповітряної оборони виявились неспроможними до ефективного і своєчасного виявлення цих ударних літальних апаратів [9]. Здатність до огинання поверхні земного рельєфу, незначні висоти лету та власні габаритні розміри ускладнюють радіолокаційним пошуковим засобам спроможність до своєчасного виявлення та визна-

чення координат і параметрів просторових переміщень цих диверсійних ударних апаратів. Переважно це обумовлено технічними складнощами у відокремленні радіолокаційними станціями відбитих від мало розмірних дронів електромагнітних хвиль від так званих "хибних перешкод", які нашаровуються, відбиваючись від високих будівель, дерев та пагорбів тощо. Ця ситуація найбільш характерна для рухомих об'єктів, що пролітають на незначних до 150-200 м висотах. Переважно саме на таких висотах і летять ворожі БПЛА, включно із дронами Shahed-136 [2, 3].

І хоч вибухи ворожих дронів-камікадзе за руйнівною здатністю істотно поступаються руйнаціям від ракетних ударів, та все ж мало захищеним від бомбових

Інформація про авторів:

Афтаназів Іван Семенович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри нарисної геометрії та графіки.

Email: ivan.s.aftanaziv@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-3484-7966>

Строган Орися Іванівна, канд. техн. наук, ст. викладач, кафедра нарисної геометрії та графіки. Email: orysia.i.strohan@lpnu.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-1790-6736>

Шевчук Анжела Олександрівна, ст. викладач, кафедра нарисної геометрії та графіки. Email: anzhela.o.shevchuk@lpnu.ua;

<https://orcid.org/0000-0001-8963-4082>

Струтинська Леся Романівна, канд. екон. наук, доцент, кафедра менеджменту персоналу та адміністрування.

Email: lesyastrutyn@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0401-5475>

Цитування за ДСТУ: Афтаназів І. С., Строган О. І., Шевчук Л. І., Струтинська Л. Р. Уточнення координат ворожих БПЛА засобами кінематичного проектування. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 1. С. 53–60.

Citation APA: Aftanaziv, I. S., Strohan, O. I., Shevchuk, L. I., & Strutynska, L. R. (2024). Specifying the coordinates of enemy UAVs by means of kinematic design. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(1), 53–60. <https://doi.org/10.36930/40340108>

ударів об'єктом інфраструктури, наприклад, електричним підстанціям, мережам газо- та водопостачання тощо завдають відчутної шкоди.

До того ж, очевидно, враховуючи незначну вартість дронів моделі Shahed-136, що переважно не перевищує 11-15 тис. доларів США, ворожі війська запускають їх одночасно десятками, що зайвий раз ускладнює завдання їх перехоплення. Очевидно саме тому на початкових етапах їх використання частка знищення ворожих дронів силами оборони країни часто не перевищував 60 %.

Потрібно визнати, що існує нагальна потреба у вдосконаленні наявних і розробленні нових засобів, а також досконалих методик своєчасного виявлення та ліквідації ворожих безпілотних літальних апаратів.

Об'єкт дослідження – кінематичне проектування як засіб графічного відображення закономірностей просторових переміщень об'єктів.

Предмет дослідження – методи і засоби визначення специфічних особливостей пошуку та фіксації траєкторій просторових переміщень безпілотних літальних апаратів, що дасть змогу встановити координати їх миттєвого розташування у просторі.

Мета роботи – розробити методику уточнення координат і траєкторій просторових переміщень БПЛА засобами кінематичного проектування, що дасть змогу визначити їх миттєве розташування у просторі.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- розроблення методики визначення координат, швидкостей та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами кінематичного проектування;
- розроблення принципових схем розміщення радіолокаційного пошукового устаткування для успішного виявлення ворожих БПЛА.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематиці своєчасного виявлення пролітаючих на незначних висотах БПЛА у останні роки загострення військових протистоянь приділялась доволі підвищена увага як з боку науковців України, так і вченими багатьох зарубіжних країн. Зокрема науковцями Харківського Національного університету повітряних сил ім. І. Кожедуба було досліджено так званий метод різницево-далекомірного визначення координат БПЛА. Результати цих досліджень, проведених під керівництвом М. І. Чернишева та В. В. Куценко, відображено у роботі [4]. Автори пропонують оцінку точності визначення координат БПЛА здійснювати так званим різницево-далекомірним методом в рухомій системі пасивної радіолокації на базі зенітних комплексів малої дальності. Похибки визначення координат літальних апаратів цим методом є неістотними. Даний метод дає можливість місця розташувань БПЛА визначити із точністю, співрозмірною із розмірами розшукуваних об'єктів [7, 8]. Створені авторами математичні залежності надають змогу обирати оптимальні розташування бойових машин із обладнанням пасивної пеленгації. Проте відчутним недоліком даного способу визначення координат БПЛА є потреба у значній кількості технічних засобів для його реалізації. Зокрема, чотирьох маневрених віддалених один від іншого на віддалі 500-3000 м радіопеленгаторів, а також командного пункту. Тому для обслуговування такої значної кількості техніки знадобиться аж 10-15 осіб [4].

Свого часу фахівці аерофотогеодезії доволі активно досліджували спроможність визначення координат

просторового розташування безпілотних дронів, задіяних до фотографування та відеозйомок місцевості при виготовленні фізичних карт та топографічних планів [6, 10, 17]. Паралельно цим дослідженням науковці кафедри нарисної геометрії НУ "Львівська політехніка" свої пошуки спрямували у сферу вивчення та розробки методологій практичного застосування так званого кінематичного проектування. Проектування, що спроможне пов'язати між собою координати, швидкості та траєкторії рухів окремих складових проектування [12, 14]. Започатковане у середині минулого століття кінематичне проектування переважно використовувалося тільки у кінематографії для забезпечення узгодженості переміщень у просторі акторів, кінознімальної техніки та освітлювальної апаратури. Саме тут зуміли себе яскраво проявити такі переваги кінематичного проектування, як спроможність органічно пов'язати між собою у просторі та часі об'єкти проектування, так звану "картинну" площину та спостерігача [13].

Військові події на території України сприяли інтенсифікації досліджень в галузі використання кінематичного проектування, зокрема і для визначення координат ворожих ударних і диверсійно-розвідувальних БПЛА. Так у роботі [3] розглянуто можливість перехоплювати ворожі диверсійно-розвідувальні БПЛА своїми дронами-перехоплювачами, застосовуючи для розрахунків їх траєкторії руху та координат методики кінематичного проектування. Тут доволі ґрунтовно розкрито специфіку запровадження координатної системи для відліку переміщень БПЛА кінематичним проектуванням, запропоновані математичні залежності для підрахунків координат та параметрів руху літальних апаратів [2, 11].

Доречно відзначити, що проблемі вдосконалення методики уточнення координат, траєкторій та законів руху рухомих об'єктів приділяють значну увагу і науковці зарубіжжя. Правда за відсутності військових протистоянь на їх траєкторіях вони більше приділяють увагу вдосконаленню методик визначення, пошуку та уточненню координат рухомих об'єктів не у повітряному просторі, а на морських і прісноводних водоймах. Здійснюють це переважно з метою пошуку координат плавучих безпілотних дистанційно керованих човнів, а також мін. Згідно з їх рекомендаціями, доволі ефективним для цього є залучення пошукових безпілотних літальних апаратів, які спроможні істотно розширити обсяги досліджуваних просторів і площ. Подібні дослідження ґрунтовно описані в роботах [5, 16]. Зокрема автори роботи [5] відзначають, що застосування для пошуків уточнених координат плавучих мін безпілотних літальних апаратів значно ефективніше і дешевше порівняно із використанням гелікоптерів чи плавучих пошукових суден. Опираючись на досвід роботи ВМС США схожу позицію поділяє і автор роботи [16], посиляючись на ефективну пошукову роботу американської безпілотної протимінної платформи.

Отже, потрібно визнати, що проблематика пошуку та визначення точних координат рухомих об'єктів як у повітряному просторі, так і на морських просторах була, є і залишається доволі актуальною. Встановлено, що методи кінематичного проектування спроможні певною мірою вдосконалювати наявні технології визначення координат та траєкторій просторових переміщень ворожих безпілотних літальних чи плаваючих апаратів для ефективного їх перехоплення та знищення. Однак дос-

віду використання кінематичного проектування для захисту військових об'єктів і населених пунктів від нападу ворожих безпілотних літальних апаратів поки що немає. Тому доцільними та актуальними залишаються дослідження, що спрямовані на розширення можливостей застосування кінематичного проектування для захисту особового складу військових підрозділів, цивільного населення та інфраструктури міст і селищ від атак ворожих БПЛА. У т. ч. й тих, що пролітають на незначних висотах і важко піддаються ідентифікації радіолокаційними засобами.

Матеріали та методи дослідження. У процесі проведення теоретико-експериментальних досліджень застосовувались методи та методики фізичного і математичного моделювання швидкоплинних процесів і математичної статистики аналізу та класифікації їх результатів. Основою експериментального дослідження були положення теорії відображення координат та траєкторій просторових переміщень рухомих об'єктів засобами нарисної геометрії при поєднанні класичного ортогонального проектування із динамічними особливостями кінематичного проектування.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

На рис. 1 зображена запропонована схема просторового розташування обладнання та технічних засобів виявлення і визначення точних координат та ліквідації ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА. Основними її елементами та складовими є оснащений обчислювальною апаратурою із відповідним програмним забезпеченням для розрахунків координат командний пункт 1. Радіолокаційна станція 2 командного пункту 1 налаштована на сприйняття сигналів і інформації від завчасно розміщеного у повітряному просторі барожуючого дрона-перехоплювача 3 та фіксацію ворожого безпілотного літального апарату 4. Піднятий по оголошенню тривоги у повітряний простір дрон-перехоплювач 3 теж оснащено малогабаритним радаром 5, наприклад, вітчизняного виробництва моделі ADMU-12 або радаром моделі Thales Sauiре, виготовленим у Нідерландах. Перевагою цих радарів є незначні (500×400 мм) розміри та маса (≈40 кг), що дає можливість облаштовувати їх на легкових автомобілях та дронах середніх типорозмірів. Радар 5 дрона-перехоплювача 3 налаштовано на спрямування електромагнітних пошукових сигналів 6 на ворожий БПЛА, сприйняття відбитих від нього сигналів і передачу цієї інформації сигналами 7 електромагнітного випромінювання РЛС 2 командного пункту 1. Поряд із сприйняттям сигналів і інформації від переносного радара 5 дрона-перехоплювача 4 радіолокаційна станція 2 командного пункту 1 налаштована і на геолокацію ворожого БПЛА сигналами 8 електромагнітного випромінювання. Тут же на рис. 1 стрілками та розмірними лініями схематично відображено інформацію щодо визначення траєкторій 11 та 12, а також напрямів векторів швидкостей просторових переміщень дрона-перехоплювача та ворожого БПЛА і його віддаленості від командного пункту.

Для ліквідації ворожих БПЛА 4 передбачено застосування крупнокаліберної стрілецької зброї (на рисунках не відображено) або дронів-ліквідаторів (камікадзе) 9, що оснащені дистанційно керованим боезарядом 10, та завчасно спрямовані у точку простору із розрахова-

ними командним пунктом 1 просторовими координатами прильоту ворожого БПЛА.

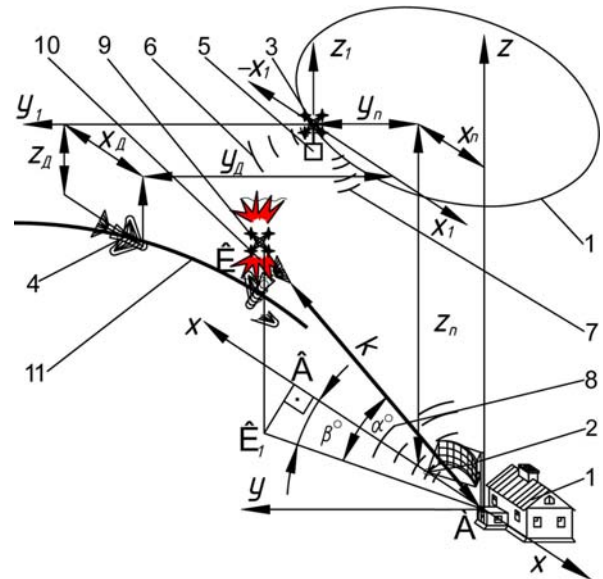


Рис. 1. Принципова схема уточнення координат ворожих БПЛА засобами кінематичного проектування / Schematic diagram of specifying the coordinates of enemy UAVs by means of kinematic design

На рис. 2 відображено схему поетапного визначення траєкторії та параметрів руху ворожого БПЛА. Нумерацію позицій тут збережено відповідно до рис. 1. Віддаля a від командного пункту 1 до віддаленості на момент фіксації ворожого БПЛА 4 радаром 5 дрона-перехоплювача 3 тут умовно розділено на чотири однакових по довжині частини протяжністю $0,25a$ кожна, які у подальшому називатимуть етапами I-IV. Перший з цих етапів (етап I), як у часовому відліку, так і у просторовій його віддаленості, починається з моменту фіксації ворожого БПЛА радаром 5 дрона-перехоплювача 3 або радіолокаційною станцією 2 командного пункту 1. На момент фіксації ворожого БПЛА 4 обчислювальною програмою командного пункту 1 перераховують азимутні координати цього виявленого літального апарату у ортогональні ($x_0; y_0; z_0$) в завчасно запровадженій декартовій системі координат. Швидкість V_0 цього ворожого літального апарату та його траєкторія польоту тут ще не відомі.

На межі завершення першого етапу та початку другого знову фіксують ортогональні координати ворожого БПЛА 4. Тут на другому етапі (етап II на рис. 2), володіючи даними щодо координат та пройденого шляху S (км) від етапу I, а також тривалістю цього польоту $t(c)$, визначають швидкість польоту літального апарату 4

$$v_{II} = \frac{S_I}{t_{I-II}} = \frac{1}{t_{I-II}} \sqrt{(X_{K1} - X_{K2})^2 + (Y_{K1} - Y_{K2})^2 + (Z_{K1} - Z_{K2})^2}, (1)$$

де: $K_I(X_{K1}; Y_{K1}; Z_{K1})$ та $K_{II}(X_{K2}; Y_{K2}; Z_{K2})$ – координати літального апарату на позиціях I та II; t_{I-II} – тривалість польоту ворожого БПЛА на етапі I.

На проміжному третьому етапі уточнюють траєкторію та параметри польоту ворожого БПЛА.

Швидкісні параметри польоту безпілотного літального апарату визначають із наступних міркувань. Володіючи координатами просторового розташування рухомого об'єкту на кожному із запроваджених нами етапів вимірюють час Δt , тобто тривалість його перельоту із кожного попереднього етапу на наступний.

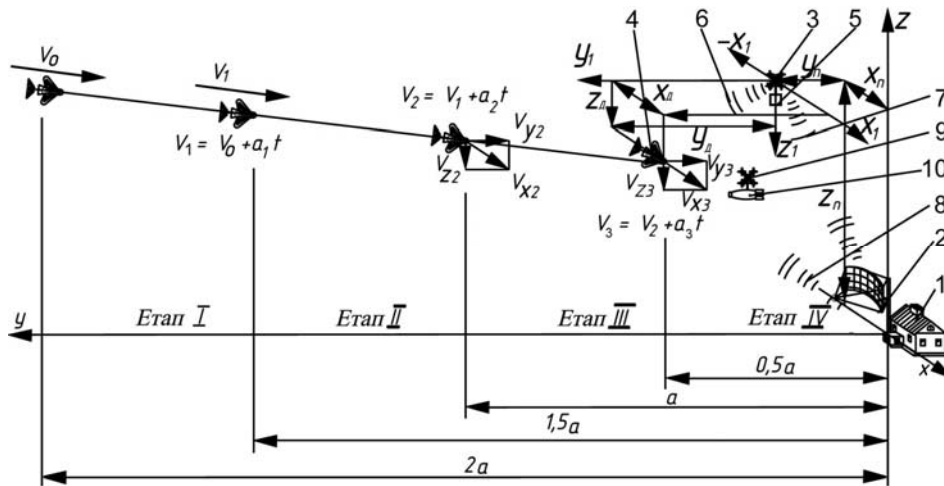


Рис. 2. Схема поетапного визначення траєкторії та параметрів руху ворожого БПЛА / Scheme of step-by-step determination of the trajectory and movement parameters of the enemy UAV

Тоді швидкість v_i на i -му етапі перельоту визначатиметься залежністю

$$v_i = v_{i-1} + a_{i-1}t,$$

де: v_{i-1} – швидкість БПЛА на попередньому етапі перельоту; $a_{i-1} = \frac{v_{i-1} - v_{i-2}}{\Delta t}$ – пришвидшення БПЛА на попередньому етапі; t – тривалість перельоту від попереднього до розрахункового етапу.

Тут же на завершенні другого етапу і впродовж тривалості третього етапу за потреби визначають тензорні вектори швидкостей руху ворожого літального апарата за напрямками осей запроваджених систем ортогональних координат. При цьому використовують залежності

$$v_x = \frac{x_3 - x_2}{\Delta t}; \quad v_y = \frac{y_3 - y_2}{\Delta t}; \quad v_z = \frac{z_3 - z_2}{\Delta t};$$

де: x_3, y_3 та z_3 – координати ворожого літального апарата на межі етапу III; x_2, y_2 та z_2 – координати ворожого літального апарата на межі етапу II; Δt – тривалість перельоту літального апарата над дистанцією третього етапу.

По почергових точках координат та розрахованих параметрах руху (швидкість, пришвидшення, тривалість тощо) розраховують координати зручної для ураження ворожого БПЛА 4 його просторової диспозиції на етапі IV та час прибуття туди цього рухомого ворожого літального апарату.

На четвертому етапі (етап IV на рис. 2) заплановано ураження ворожого літального апарату. Тут на підставі визначених координат рухомого об'єкту $K_{III}(X_{K3}; Y_{K3}; Z_{K3})$, його швидкості $v_{III} = v_{II} + a_{II-III}t$ та напрямку руху, окресленого траєкторією на етапах I, II та III, націлюють на ворожий літальний апарат 4 наявні на опорному командному пункті 1 дрона-камікадзе 9. Прорахувавши на етапах II та III параметри та траєкторію руху ворожого літального апарату 4, із опорного командного пункту 1 піднімають у повітря дрон-камікадзе 9 із боезарядом 10, що оснащений вибухівкою із картечкою або шрапнеллю. Цей дрон-камікадзе 9 спрямовують у точку повітряного простору (етап IV на рис. 2), координати якої розраховують як майбутні можливі координати ворожого БПЛА 4 по прильоті його на позицію IV, тобто у точку із координатами $(X_K; Y_K; Z_K)$. У момент прильоту ворожого БПЛА 4 на позицію IV при мінімальному наближенні до очікуваного його дрона-камікадзе 9 подається команда на вибух бойового заряду 10 дрона-ка-

мікадзе 9. Є сподівання, що вибухова хвиля, уламки дрона, шрапнель чи картеч вибухового заряду пошкодять ворожий БПЛА 4 і він буде неспроможним виконати поставлену йому бойову задачу.

Тут миттєві координати X_K, Y_K та Z_K просторового розташування ворожого БПЛА та його віддаленість k від командного пункту визначають, розраховуючи їх з математичних залежностей

$$X_K = |x_n - x_g| \pm (v_{nx} - v_{gx})\Delta t; \quad Y_K = |y_n - y_g| \pm (v_{ny} - v_{gy})\Delta t;$$

$$Z_K = |z_n - z_g| \pm (v_{nz} - v_{gz})\Delta t;$$

$$k = \frac{x_K}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} \pm \sqrt{(v_{nx} - v_{gx})^2 + (v_{ny} - v_{gy})^2 + (v_{nz} - v_{gz})^2} \cdot \Delta t, (2)$$

де: x_n, y_n та z_n – координати дрона-перехоплювача в стаціонарній ортогональній системі координат із початком відліку на антені РЛС командного пункту; x_g, y_g та z_g – координати ворожого БПЛА в рухомій системі координат із початком відліку на радарі дрона-перехоплювача; v_{nx}, v_{ny} та v_{nz} – складові тензора швидкостей просторових переміщень дрона-перехоплювача за напрямками осей в рухомій системі координат; v_{gx}, v_{gy} та v_{gz} – складові тензора швидкостей просторових переміщень ворожого БПЛА за напрямками осей стаціонарної системи координат; Δt – тривалість часу між сусідніми почерговими замірами параметрів руху ворожого БПЛА; α – кут нахилу відрізка прямої, що проходить через РЛС і ворожий БПЛА, до площини горизонту xOy ; β – кут нахилу проекції цього відрізка на площину горизонту xOy до осі x стаціонарної ортогональної системи координат із початком відліку на антені РЛС командного пункту.

Знак "+" використовують при співпадінні напрямів осей стаціонарної та рухомої систем координат командного пункту та дрона-перехоплювача. Відповідно "–", якщо напрями цих осей протилежні.

Результати розрахунків прикладу застосування запропонованого методу для захисту військових угруповань, населених пунктів і об'єктів їх інфраструктури від нападу ворожих ударних і диверсійно-розвідувальних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) відображено на рис. 3.

Нехай початок запровадженої стаціонарної ортогональної системи координат облаштовано у точці розміщення антени радіолокаційної станції 2 (точка А) командного пункту 1 (див. рис. 3), вісь x спрямована

вздовж лінії горизонту, вісь z спрямована вгору, а вісь y перпендикулярна осям x та z і направлена в напрямку очікуваної появи літального апарату 4. По аналогічних напрямках спрямовано осі x_1 , y_1 та z_1 рухомої ортогональної системи декартових координат, облаштованої на спорядженому пересувним радаром 5 дрону-перехоплювачі 3, що здійснює політ на незначних швидкостях по круговій чи еліптичній траєкторії над командним пунктом 1 та над територією етапу IV, де передбачено ураження ворожого БПЛА 4.

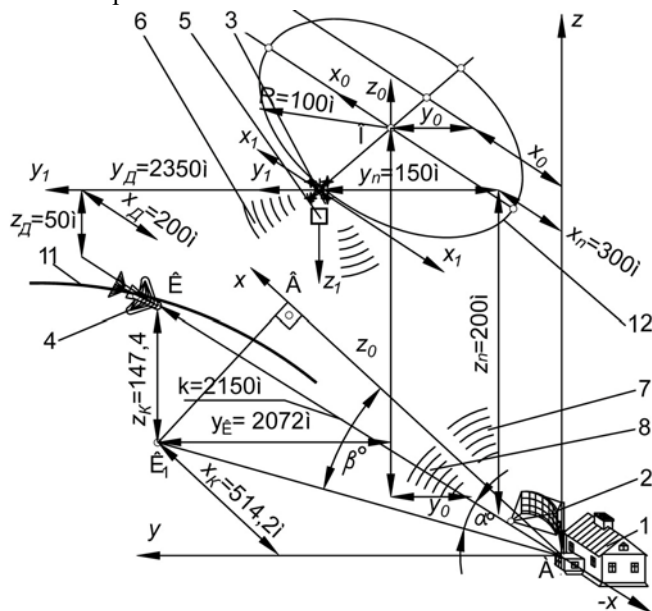


Рис. 3. Приклад застосування кінематичного проектування для визначення координат БПЛА у наближеній до нього точці $M(x_m, y_m, z_m)$ розташування дрона-перехоплювача / Example of the application of kinematic design to determine the coordinates of a UAV at the closest point $M(x_m, y_m, z_m)$ of the location of the interceptor drone

Нехай на рівні початку першого етапу I було виявлено ворожий безпілотний літальний апарат 4, що прямує у напрямку населеного пункту, міста чи об'єкту інфраструктури, яке захищає даний опорний захисний пункт 1. Вважатимемо, що спрямовані радаром 5 дрона-перехоплювача 3 електромагнітні випромінювання зафіксували даний літальний апарат 4, виявивши орієнтований напрям його розташування та наближені координати $K_0(x_0; y_0; z_0) = K_0(2500 \text{ м}; 10000 \text{ м}; 200 \text{ м})$.

Ця інформація про виявлений дронам-перехоплювачем 3 рухомий у просторі об'єкт, а саме орієнтовний напрям його переміщення та відповідні азимути його розташування, передаються на обчислювальну апаратуру командного пункту 1. Відповідним програмним забезпеченням ця інформація опрацьовується, перераховуючи азимут та напрямок розміщення літального апарату на його координати у стаціонарній системі ортогональних координат командного пункту 1. В міру наближення ворожого БПЛА 4 та подолання ним усіх запроваджених етапів I, II та III на підставі даних радара 5 дрона – перехоплювача 3 на кожному з них по чергову перераховуються та уточнюються усі координати, траєкторія та параметри руху ворожого літального апарату 4.

Для спрощення та полегшення сприйняття прикладу реалізації способу вважатимемо, що ворожий БПЛА 4 рухається із незначними боковими відхиленнями в площині, що паралельна площині проєкцій (yOz) по наближеній до параболітичної спадаючій траєкторії (див. рис.

3). Для перехоплення цього ворожого БПЛА на ділянці ураження (етап IV) у повітряний простір піднято дрон-перехоплювач 3, оснащений переносним радаром 5 для відстежування координат та траєкторії руху ворожого літального апарату 4. Дрону-перехоплювачу 3 задано наступні параметри польоту:

- траєкторія руху – коло радіусом $R = 100 \text{ м}$;
- висота польоту $h = 200 \text{ м}$, швидкість польоту $v_n = 15 \text{ км/год.} = 4,2 \text{ м/с}$;
- траєкторія польоту паралельна площині горизонту xOy , висота польоту постійна;
- координати центра кола траєкторії польоту дрона-перехоплювача 3 в стаціонарній ортогональній системі координат командного пункту 1 $O_1(300 \text{ м}; 50 \text{ м}; 200 \text{ м})$.

Для демонстрації можливостей запропонованого способу координати ворожого БПЛА на ділянці ураження розраховано при чотирьох типових варіантах розташування дрона-перехоплювача 3 у повітряному просторі. А саме у діаметрально протилежних точках кола траєкторії руху, що розташовані на паралельних осях x та y діаметрах. Розрахунки координат ворожого БПЛА 4 здійснено по запропонованих математичних залежностях (1) та (2) при заданій швидкості польоту ворожого БПЛА $v_g = 162 \text{ км/год.} \approx 45 \text{ м/с}$.

У даному випадку значення швидкостей дрона-перехоплювача v_n та ворожого БПЛА v_g за встановленими напрямками осей визначено із використанням математичної залежності (2) як співвідношення довжини здійсненого ним перельоту S до його тривалості Δt у запроваджених системах координат. А саме:

- для дрона-перехоплювача в стаціонарній системі координат

$$v_{nx} = v_{ny} = \frac{S_n}{\Delta t}; v_{nz} = 0;$$

- для ворожого БПЛА

$$v_{gx} = \frac{S_{gx}}{\Delta t}; v_{gy} = \frac{S_{gy}}{\Delta t}; v_{gz} = \frac{S_{gz}}{\Delta t}.$$

Для аналізованої в прикладі застосування даного методу точки M (див. рис. 3) ці параметри матимуть наступні значення:

- для дрона-перехоплювача 3, що переміщається колом радіусом $R=100 \text{ м}$ із сталою швидкістю $v_n=15 \text{ км/год.} = 4,2 \text{ м/с}$

$$v_{nx} = v_{ny} = \frac{14,2}{10} = 1,42 \text{ м/с}; v_{nz} = 0;$$

- для ворожого БПЛА 4, що рухається із сповільненням в паралельній двом осям площині zOy

$$v_{gx} = \frac{S_{gx}}{\Delta t} = 0; v_{gy} = \frac{S_{gy}}{\Delta t} = \frac{442}{10} = 44,2 \text{ м/с}; v_{gz} = \frac{S_{gz}}{\Delta t} = 0,26 \text{ м/с}$$

де: $S_{gy} = 442 \text{ м}$ – пройдений БПЛА за $\Delta t = 10 \text{ с}$ шлях в напрямі осі y при його швидкості польоту $v_g = 165 \text{ км/год.} \approx 45 \text{ м/с}$; $S_{gz} = 2,6 \text{ м}$ – перепад висоти польоту БПЛА впродовж 10 с .

Аналогічними вони будуть і для точки F та інших точок кола польоту дрона-перехоплювача.

Віддалі ворожого БПЛА 4 від командного пункту 1 та координати його просторового розташування тут визначено із математичних залежностей (1) та (2) із врахуванням швидкостей просторових переміщень його та дрона-перехоплювача 3 впродовж призначених інтервалів часу тривалістю $\Delta t(c) = 10,20$ та 30 с .

При тривалості польоту ворожого БПЛА в зоні ураження впродовж 10 с його остаточна точка траєкторії матиме координати $X_K = 514,2 \text{ м}$; $Y_K = 2072 \text{ м}$; $Z_K = 147,4 \text{ м}$ за віддаленості від командного пункту (по пря-

мій лінії) 2140 м. При тривалості польоту $\Delta t(c) = 20$ с ці координати матимуть значення $X_K = 528,4$ м; $Y_K = 1644$ м та $Z_K = 144,8$ м із віддаленістю від командного пункту 1732,8 м. Аналогічно при $\Delta t(c) = 30$ с $X_K = 542,6$ м; $Y_K = 1216$ м та $Z_K = 142,2$ м, а віддаленість становить 1339,2 м.

Віддаль ворожого БПЛА 4 від командного пункту 1 та координати його просторового розташування тут визначено із математичних залежностей (1) та (2) із врахуванням швидкостей просторових переміщень його та дрона-перехоплювача 3 впродовж призначених інтервалів часу тривалістю $\Delta t(c) = 10, 20$ та 30 с. Ця інформація необхідна щоб розрахувати та задати параметри польоту спрямованого на знищення ворожого БПЛА 4 дрона-камікадзе 9 у очікуваний квадрат повітряного простору їх зустрічі.

Визначені координати дрона-перехоплювача 3 у стаціонарній ортогональній системі координат командного пункту 1 співпадають для усіх точок можливого розташування дрона-перехоплювача 3 на довжині кола його кругової траєкторії. Це свідчить про доцільність практичного застосування запропонованих математичних залежностей, про їх придатність для уточнення координат миттєвого розташування у просторі рухомих об'єктів, а відповідно, і відображення траєкторій їх просторових переміщень.

Обговорення результатів дослідження. Порівняно із відомими методами визначення координат та параметрів руху літаючих на незначних висотах літальних апаратів перевагою вище описаного є те, що він завдяки піднятому в повітряний простір на дронів-перехоплювачі радарові, спроможний у півтора-два рази збільшити радіус ділянки виявлення невідомих літальних апаратів. Більший радіус ділянки виявлення рухомого об'єкта забезпечує більше часу на визначення точніших координат та параметрів руху цього об'єкта [13]. 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 завдяки даному 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 [6].

Ефективність запропонованого застосування на пошукових БПЛА радіолокаційної апаратури типу радар підтверджує і досвід Туреччини. На безпілотних літальних апаратах їх виробництва моделі TAI Anka замість розпізнавальної оптичної станції встановлені радары моделі MILSAR SARMTI від Meteksan Defense. Це надає можливість розшукувати навіть такі порівняно незначні за розмірами об'єкти як дрейфуючі міни за будь-якої погоди та незалежно від пори доби. Ці дані оприлюднила агенція оборонної промисловості Туреччини Savunma Sanayii Baskanligi на завершених 2022 року. Порівняно із описаною в роботі [5] методикою застосування БПЛА для пошуку рухомих об'єктів на поверхні води застосування запропонованих пошукового радара та засобів кінематичного проектування для опрацювання його даних дають можливість ефективно використовувати це устаткування для пошуку рухомих об'єктів у

повітряному просторі. Зокрема і дронів іранського виробництва моделі Shahed-136.

Як підсумок можна означити наступне. Запропонована схема організації опорних пунктів ліквідації ворожих низько швидкісних пілотованих чи безпілотних літальних апаратів ґрунтується на облаштуванні оснащених обчислювальною апаратурою із відповідним програмним забезпеченням командних пунктів із доступними засобами ліквідації цих ворожих літальних апаратів. Як один із найдієвіших варіантів безпосередньо ліквідації ворожих літальних апаратів пропонується застосування дронів-камікадзе. У основу розрахунків точних координат літальних об'єктів, параметрів їх руху та траєкторій покладено методологію кінематичного проектування, яка передбачає можливість оперувати усіма рухомими у просторі складовими проектування. У даному випадку таким рухомих об'єктом постають ворожий безпілотний літальний апарат, дрон-перехоплювач та дрон-ліквідатор (камікадзе).

Без сумніву, дана методика визначення точних координат літальних об'єктів може застосовуватися не тільки для дронів Shahed-136, а й для інших літаючих на незначних висотах та швидкостях літальних апаратів, наприклад, гвинтокрилів, безпілотних літальних апаратів типу "Орлан" [1] тощо.

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-перехоплювачем, ні дроном-камікадзе тоді скористатися не вдасться [15]. Однак, можна вважати, що наявні переваги вагоміші за недоліки, обумовлені не такими вже і частими для території України штормовими негодами.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблено методику уточнення координат рухомих у повітряному просторі ворожих БПЛА завдяки додатково розташованому в зоні ураження оснащеного пошуковим радаром дрону із можливістю опрацювання його інформативних даних засобами і математичним апаратом кінематичного проектування.

Практична значущість результатів дослідження – півтора-двократне збільшення ділянок своєчасного виявлення ворожих диверсійно-розвідувальних безпілотних літальних апаратів, що пролітають на незначних висотах над нерівностями земної поверхні, завдяки піднятому на певну висоту в повітря дрону-перехоплювачу, оснащеному переносним радаром. Наявність точних координат майбутнього розташування ворожого БПЛА надає можливість застосовувати для його ураження завчасно піднятих у повітря дронів-камікадзе (ліквідаторів), вартість яких істотно менша за ракетне озброєння зенітно-ракетних комплексів (ЗРК) малої віддаленості.

Висновки / Conclusions

У досягнення мети даного дослідження покладено запропоновану авторами ідею використання засобів кінематичного проектування для визначення координат та параметрів руху безпілотних літальних апаратів, що

ґрунтується на органічному поєднанні спроможності радіолокаційних пошукових засобів до виявлення орієнтовних напрямів просторового розташування рухомих об'єктів із придатністю кінематичного проектування до обчислення координат та параметрів переміщень цих об'єктів у просторі. За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки:

1. У основу розрахунків координат пілотованих і безпілотних літальних апаратів кінематичним проектуванням покладено одночасне відстежування декількох радіолокаційними станціями динаміки змін розмірів і кутів просторового переміщення у просторі цих об'єктів. Використовувані при цьому умовні проектуючі промені імітують сфокусований напрям на об'єкт електромагнітних хвиль радарів.
2. У основу визначення таких параметрів руху БПЛА, як його швидкість та пришвидшення покладено фіксацію на певних етапах лету проміжних миттєвих координат просторового розташування літального апарату в поєднанні із відстежуванням часу його переміщення між цими етапами.
3. Надана кінематичним проектуванням можливість прогнозування траєкторій та майбутніх координат ворожих літальних апаратів надає можливість застосування для їх ліквідації порівняно дешевших за вартістю ракетні комплекси засобів ураження, наприклад, стрілецької крупнокаліберної зброї чи оснащених дистанційно керованим вибуховим боєзарядом дронів-камікадзе. Надані кінематичним проектуванням точні миттєві координати просторового розташування ворожих літальних апаратів відкривають хорошу перспективу можливості їх ураження у нічні періоди доби, чи за умов їх поганої видимості.

References

1. Aftanaziv, I. S., Shevchuk, L. I., Stotsko, R. Z., Svidrak, I. H., Strohan, O. I., & Strutynska, L. R. (2022). Search of floating mines by unmanned aerial vehicles using kinematic projection methods. *Transport Development*, 3(14), 143–165. <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.11>
2. Aftanaziv, I. S., Stocko, R. Z., Shevchuk, A. O., Strohan, O. I., & Bojko, O. O. (2022). Determination of coordinates and movement parameters of unmanned aerial vehicles. *Systems of Arms and Military Equipment*, 3(71), 49–59. <https://doi.org/10.30748/soivt.2022.71.07>
3. Aftanaziv, I. S., Stotsko, R. Z., Shevchuk, A. O., Strutynska, L. R., Strohan, O. I., & Boiko, O. O. (2023). Protection of settlements against combat and sabotage-reconnaissance unmanned aerial vehicles. *Systems of Arms and Military Equipment*, 1(73), 83–95. <https://doi.org/10.30748/soivt.2023.73.10>
4. Chernyshev, M. I., & Kutsenko, V. V. (2018). Assessment of accuracy of definition of position of the UAV by a difference-ranging method in the moving system of a passive radar-location in air defense complexes ground forces of small range. *Systems of Arms and Military Equipment*, 2(54), 61–66. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.54.08>
5. Fu, J. (2011). The analysis of the U. S. Navys anti-mine capability and unmanned anti-mine platform equipment [J]. *Modern Ships*, 7, 44–47.
6. Hlotov, V., Fys, M., & Pashchetnyk, O. (2020). Development of a technique for increasing the accuracy of determining the spatial coordinates of object points during aerial photography from a UAV. *Geodesy, cartography and aerial photography*, 92, 45–54. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.92.045>
7. Kutsenko, L. M., Zapolskyi, L. L., & Sukharkova, O. I. (2018). Geometric modeling of mobile gravitational installation for starting the drones of a type of the aircraft. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, 94, 60–65. URL: https://dnbuv.gov.ua/UJRN/prgeoig_2018_94_12. [In Ukrainian].
8. Kutsenko, V. V., Kovalenko, S. P., & Dobrovolskyi, D. D. (2017). Parameters numerical values of errors distribution law in coordinate measuring process at the difference-distance measuring passive location method. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 1, 82–84. URL: https://dnbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2017_1_19
9. Pozdniakov, Y. K., Tkachenko, V. N., & Korotkov, V. V. (2014). Increase of accuracy of definition of coordinates by multi-positioning on passive complexes on a basis of difference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions. *Radio Electronics and Communications Systems*, 57(9), 394–402. <https://doi.org/10.3103/S0735272714090027>
10. Shults, R. V., Voitenko, S. P., Krelshstein, P. D., & Malina, I. A. (2015). The issue of calculating points positioning accuracy for aerial photographs from unmanned aerial vehicles. *Engineering Geodesy*, 62, 124–136. URL: https://dnbuv.gov.ua/UJRN/Ig_2015_62_14. [In Ukrainian].
11. Svidrak, I. G., Aftanaziv, I. S., Shevchuk, L. I., & Strohan, O. I. (2022). Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. *Mathematical Modeling and Computing*, 9(2), 459–469. <https://doi.org/10.23939/mmcc2022.02.459>
12. Svidrak, I. H., Aftanaziv, I. S., Strohan, O. I., & Shevchuk, A. O. (2021). Kinematic projection in modern technologies. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 23(96), 67–75. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9612>
13. Svidrak, I. H., Baranetska, O. R., Topchii, V. I., Shevchuk, A. O., & Halkina, N. S. (2014). Determination of spatial co-ordinates of points of panoramic survey. *Suchasni problemy modelivuvannia*, 2, 136–140. URL: https://dnbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2014_2_23. [In Ukrainian].
14. Svidrak, I. H., Shevchuk, L. I., Strohan, O. I., Strutynska, L. R., & Strohan, I. V. (2021). Kinematic projection as a means of technology control in automated tillage complexes. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(5), 102–107. <https://doi.org/10.36930/40310516>
15. Virchenko, S. H. (2018). Some questions of complex dynamic forming on the example of desing of the aircraft wing. *Applied Geometry and Graphics*, 94, 20–25. URL: https://dnbuv.gov.ua/UJRN/prgeoig_2018_94_6. [In Ukrainian].
16. Wang, J., & Wang, H. (2021). The analysis of the development trend of antimine UAV(J). *Digital Ocean and Underwater Offensive Defense*, 4(2), 113–116.
17. Yanchuk, R. M., & Trokhymets, S. M. (2017). Creating cartographic basis for developing master plans of settlements on materials of aerial surveys using unspecialized inexpensive UAV. *Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering. Technical Sciences*, 1(77), 32–39. [In Ukrainian]. URL: <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/tehn/article/view/228>

I. S. Aftanaziv, O. I. Strohan, L. I. Shevchuk, L. R. Strutynska

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

SPECIFYING THE COORDINATES OF ENEMY UAVS BY MEANS OF KINEMATIC DESIGN

The problem of increasing the effectiveness of air defense of military groups and civilian settlements against attacks by enemy unmanned aerial vehicles (UAVs) during the time of military confrontations on the territory of Ukraine was considered and analyzed. In the course of research, the timely detection and destruction of enemy drones and UAVs is found to be important not only military, but also socio-economic problem, the successful solution of which cannot be delayed and postponed until the full and successful end of hostilities. The purpose of the work is to develop a technique for specifying the coordinates and trajectory of UAV spatial move-

ments by means of kinematic design, which will enable determining their instantaneous location in space. The way to achieve this purpose is to create a methodology for determining the coordinates, velocities, and trajectories of spatial movements of mobile aircraft based on the theory of kinematic design. The theoretical and experimental research was based on the theory of mapping coordinates and trajectories of spatial movements of moving objects by means of graphic geometry when combining classical orthogonal design with dynamic features of kinematic design. A schematic diagram of the optimal placement of radar search equipment for the successful detection of enemy UAVs has been developed, and mathematical dependencies created for the first time to determine the parameters of their spatial movements are also presented. The main result of the research is the creation of a methodology for determining the exact coordinates, velocities, and trajectories of spatial movements of moving objects by means of kinematic design. This is considered to increase the effectiveness of detecting enemy attack and sabotage-reconnaissance unmanned aerial vehicles, including Iranian-made drones of the Sahed-136 model.

Keywords: unmanned aerial vehicle; interceptor drone; liquidator drone; radar equipment; weapons; search; coordinates; liquidation.