
DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt211.01.064>

CC BY-NC

ЧЕПИЖЕНКО В.І.¹, д.т.н., с.н.с,

провідний науковий співробітник відділу Інтелектуального керування

<https://orcid.org/0000-0001-8797-4868>, e-mail: chepizhenko.valeriy@gmail.com

ПАВЛОВА С.В.², д.т.н., проф.,

професор Інституту програмного забезпечення

<https://orcid.org/0000-0002-6256-5248>, e-mail: pavlova_2020@ukr.net

СКИРДА І.І.³, канд.техн.наук,

експерт з авіаційного рв'язку, навігації та спостереження (CNS expert)

<https://orcid.org/0000-0002-9363-8921>, e-mail: skyrda2@gmail.com

¹ Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України, 40, пр. Акад. Глушкова, Київ, 03187, Україна

² Шансійський сільськогосподарський університет,

81, вул. Лонгчен, Сяодань Таюань, Шаньси, 030031, Китай

³ EUROCONTROL

Rue de la Fusée, 96, Brussels, 1130, Belgium

КЕРУВАННЯ ТРАСЕКТОРНИМ РУХОМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У РОЇ

Вступ. На сьогоднішній день використання роїв безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ефективним для виконання завдань моніторингу великих площ земної поверхні та об'єктів інфраструктури, оброблення великих площ сільськогосподарських угідь, цифрового картографування, проєктування наземних об'єктів у 3D, планування та проєктування будівельних робіт, моніторингу дорожнього покриття тощо. Важливим питанням тут є потенційне виникнення одночасних конфліктів між безпілотними літальними апаратами, які рухаються в рої.

Метою роботи є розроблення масштабованого, гнучкого методу керування трасекторним рухом безпілотних літальних апаратів у рої на основі підходу штучних силових полів.

Результати. Розробленому методу притаманні властивості масштабованості та гнучкості. Метод містить простий алгоритм керування, який дає змогу декільком БПЛА виконувати політ у складі рою за заданою трасекторією, виконуючи при цьому завдання розв'язання конфліктних ситуацій (попередження зіткнень між членами рою та зі статичними та динамічними перешкодами). Запропонований метод полягає в децентралізованому керуванні роєм в реальному масштабі часу. Результати моделювання показують, що запропонований метод підвищує ефективність формування рою і виконання польоту, а також забезпечує уникнення зіткнень БПЛА.

Висновки. Запропонований метод добре масштабується та є придатним для керування роєм різних розмірів, також може бути застосований для керування роєм БПЛА з різни-

ми льотними характеристиками, оскільки формування вектору керування рухом не залежить від конкретних технічних характеристик БПЛА, але враховує певні обмеження.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, модифіковані штучні потенційні поля, рій БПЛА, метод керування, попередження зіткнень, повітряне судно літакового типу.

ВСТУП

Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА), які ще мають назву дистанційно пілотовані повітряні судна (ДППС), мають широке застосування у різних галузях промисловості і в силових структурах. Основними типами БПЛА є мультиротор, БПЛА з нерухомим крилом, однороторний БПЛА та гібрид з нерухомим крилом. Керуванням польотом БПЛА здійснюється віддаленим пілотом з наземної станції. БПЛА може здійснювати польоти з різним рівнем автономності, від автоматизації окремих режимів польоту до повністю автономного польоту без втручання пілота. У віддалених і небезпечних районах зазвичай використовуються БПЛА літакового типу, які мають високу швидкість, великий радіус дії і можуть нести більше корисного навантаження порівняно з БПЛА роторного типу. Використання рою БПЛА суттєво підвищує ефективність виконуваних завдань. Основне завдання, яке необхідно виконувати під час формування рою БПЛА та його керування, пов'язано з плануванням маршруту і визначенням безпечних траєкторій руху БПЛА у складі рою. Це завдання полягає у визначенні етапів польоту заданим маршрутом для виконання місії з дотриманням меж технічних характеристик польоту БПЛА та з урахуванням характеристик навколишнього середовища, в якому виконується політ [1]. Водночас важливою проблемою, що потребує вирішення, є попередження зіткнень між БПЛА, які формують рій, та зіткнень з динамічними та статичними перешкодами.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Методи, які використовують для попередження зіткнень між БПЛА, можна розділити на 5 основних груп [2–4]:

- 1) геометричний метод (Geometric method);
- 2) метод генетичних алгоритмів (Evolutionary Algorithm Method);
- 3) ґрид метод (Grid-based Method);
- 4) змішано-цілочисловий алгоритм лінійного програмування (Mixed Integer Linear Programming Method);
- 5) метод штучних потенційних полів (Artificial Potential Field Method).

Запорукою успішного виконання польоту є витримування заданої траєкторії польоту і стійкість конфігурації рою у разі виявлення перешкод з невідомими параметрами руху та розмірами. Щоб утримати рій на заданому шляху, система керування повинна бути стійкою, а його принцип повинен бути «жорстким» (робастним) [5]. У [5] керувальних пристроях застосовувались безперервні робастні алгоритми для формування безконфліктної траєкторії з уникненням зіткнення лідерів/підпорядкованих БПЛА з перешкодами, які впливають на траєкторії кожного з них. У роботі [6] описано метод уникнення зіткнень групи БПЛА, оснований на алгоритмі консенсусу та вдосконаленому методі штучних потенційних полів (IAPF). Використовуючи IAPF, група БПЛА може формувати заздалегідь визначену конфігурацію з будь-якого початкового стану і летіти у цільову точку.

Група БПЛА використовує стратегію «лідер-послідовник», тобто лідер БПЛА виконує самостійні польоти відповідно до вимог місії, тоді як БПЛА-послідовник слідує за польотом лідера на основі узгодженого алгоритму, і рій поступово формується під час польоту.

Модифікований метод штучних потенційних полів (МАРФ) вже застосовано в [7] для вирішення проблеми керування та відстеження рою з декількох БПЛА, що летять через обмежений простір, з використанням методу формування потенційного поля (FPF) і МАРФ, щоб гарантувати створення і підтримання заданої конфігурації рою, уникаючи зіткнень з перешкодами. Основна відмінність запропонованого методу МАРФ [7] від методу FPF полягає в тому, що МАРФ дає змогу уникати ситуацій, коли потенційні поля відштовхування інших БПЛА нейтралізують потенційні поля тяжіння цілі, що може призвести до втрати цілі. Недоліки запропонованих підходів полягають в тому, що вони застосовуються тільки для випадків керування мультикоптерами, де їх аеродинаміка дає змогу зупиняти рух БПЛА і виконувати круті розвороти. Крім того, підхід лідер/послідовник не може гарантувати стійкість конфігурації рою у разі наявності перешкод зі складними геометричними формами.

Загалом методи керування роєм можна розділити на три групи: централізовані, децентралізовані і гібридні.

У централізованих методах керування [8] одна обчислювальна одиниця контролює всю групу БПЛА і відповідно генерує безпечні траєкторії руху БПЛА в групі, а також керує рухом усієї групи. Це означає, що у разі централізованої архітектури в центрі є головний блок керування, за допомогою якого зв'язуються всі БПЛА. Центральний блок керування може знаходитись на одному з БПЛА або на наземній станції керування. У централізованих методах керування вся система з декількома БПЛА залежить від одного керувального вузла, тому ці методи мають найменшу ступінь завадостійкості.

Методи децентралізованого керування [9–11] не мають центрального вузла керування і розрізняються за двома формами: розподілене керування і ієрархічне керування. У разі розподіленого керування всі БПЛА є рівними стосовно керування; в ієрархічному методі керування є локально централізованим. У розподілених децентралізованих методах керування бажана траєкторія досягається з використанням тільки локальних законів керування, які діють на кожному БПЛА. Ці закони локального керування залежать від конкретної моделі та використаної методології. Ключовою особливістю децентралізованого керування є те, що кожен БПЛА безпосередньо обмінюється інформацією з іншими БПЛА в рої. Методи децентралізованого керування мають переваги перед централізованими, оскільки вони більш завадостійкі, масштабовані і надійні.

Зазвичай більшість систем керування не належать ні до централізованої, ні до децентралізованої архітектури. Замість цього виникає гібридна архітектура, яка комбінує загальні властивості обох підходів до керування групою БПЛА, наприклад, ієрархічна структура лідерів або навіть віртуальних лідерів. На додаток до типу керування, що використовується в системі з декількома БПЛА, також важливими є склад і розмір групи. Група з кількох БПЛА може складатися з однорідних або гетерогенних одиниць.

Вважається, що група БПЛА є однорідною, якщо можливості окремих БПЛА є ідентичними. В іншому випадку вона є неоднорідною. Будь-яке розходження у програмному або апаратному забезпеченні може зробити БПЛА відмінним від інших.

Стаття присвячена дослідженню здатності гетерогенного рою БПЛА до гнучкої зміни його конфігурації з урахуванням обмежень параметрів руху БПЛА, таких як максимальне та мінімальне значення шляхової швидкості та кутової швидкості. Рій повинен бути у змозі відновити і змінити свою конфігурацію у разі втрати структури, конфігурації або зміни кількості БПЛА в рої. Також необхідно, щоб рій міг змінювати свою конфігурацію за зміною динамічних параметрів БПЛА. Завдання керування роєм визначається як пошук алгоритму керування, який буде гарантувати, що декілька автономних БПЛА можуть підтримувати конфігурацію рою або набір конфігурацій, і при цьому виконувати політ за заданою траєкторією та уникати зіткнення з перешкодами та іншими БПЛА, гарантуючи досягнення цілі.

Метою роботи є розроблення масштабованого, гнучкого методу керування траєкторним рухом безпілотних літальних апаратів в рої на основі підходу штучних потенційних полів.

МАСШТАБОВАНИЙ, ГНУЧКИЙ МЕТОД КЕРУВАННЯ ТРАЄКТОРНИМ РУХОМ БПЛА У РОЇ

Метод штучних потенційних полів (APF) належить до методів розрахунку траєкторій польоту БПЛА в режимі реального часу. Цей метод дає змогу БПЛА виконувати рух у повітряному просторі в реальних умовах зі статичними і динамічними перешкодами, уникаючи зіткнення з ними. Він набув значного поширення завдяки своїй математичній та алгоритмічній простоті і не вимагає великих обчислювальних витрат [1]. Незначна обчислювальна складність робить метод APF придатним для керування великою кількістю БПЛА у рої. Більш того, оскільки штучні потенційні сили для кожного БПЛА розраховуються незалежно, проблема розрахунку траєкторії може потенційно розподілятися по бортових системах керування польотом кожного БПЛА, що додатково знижує обчислювальне навантаження на FMS.

Обмін інформацією в реальному часі між БПЛА, що входять до складу рою, є необхідною умовою для виконання завдань формування рою та керування роєм БПЛА. Забезпечити обмін необхідною інформацією між БПЛА можна двома способами: у разі їх взаємодії через сенсори та через радіоканали зв'язку [3]. Взаємодія БПЛА через сенсори означає використання вимірних даних, таких як дальність та азимут для визначення взаємного розташування БПЛА. Друга форма взаємодії – це обмін між БПЛА навігаційною інформацією через канали радіозв'язку, використовуючи адресні або ширококомовні повідомлення. Ця передана інформація може бути будь-якими необхідними даними, зокрема інформація про місцезнаходження (довгота, широта, висота та кути орієнтації в просторі).

Використання конкретного методу для керування роєм БПЛА значною мірою залежить від багатьох факторів[4]: стійкість; масштабованість; формування рою; підтримування устрою рою; зміна устрою та форми рою.

Стійкість рою визначає ступінь жорсткості методу, який використовується для керування роєм з метою його формування з різною густиною, аналогічно агрегатним станам речовини (тверде тіло, рідина, газ тощо). Стійкість рою належить до характеристик, чутливих до похибок в роботі системи. Отже, під час керування роєм БПЛА необхідно забезпечити мінімально допустимі значення похибок визначення координат БПЛА, максимальну точність визначення параметрів їх взаємного розташування, надійність та високу швидкість обміну даними за каналами радіозв'язку. Під час формування рою з великою кількістю БПЛА для забезпечення потрібного рівня похибок визначення координат БПЛА необхідно застосовувати методи керування роєм з великим ступенем робастності.

Масштабованість рою належить до здатності змінювати конфігурацію устрою рою у разі вилучення або додання члена рою. У рої з використанням лідера нові БПЛА додаються відповідно до геометричного або вагового центру рою. У разі втрати одного з БПЛА необхідно виконувати зміну конфігурації рою.

Завдання керування роєм можна розділити на етапи: 1) формування устрою рою; 2) підтримування устрою рою; 3) розпадання рою для здійснення посадки або для перегрупкування. Хоча завдання початкового формування устрою рою може бути тривіальним, проте завдання підтримування устрою під час виконання польоту за заданим маршрутом або виконання польотної місії є великим викликом.

Здатність динамічно змінювати конфігурацію устрою тієї чи іншої форми з будь-якої причини, наприклад, уникнення перешкод, збільшує труднощі керування роєм.

Розв'язання завдання. Проблема керування роєм БПЛА з метою координованого виконання завдань, є доволі складним технічним завданням, враховуючи необхідність формувати певну конфігурацію з великою кількістю БПЛА в конкретну геометричну фігуру. Геометрична форма або конфігурація рою значною мірою залежать від завдання польоту і навколишнього середовища. Різні типи форм може бути використано у керуванні роєм. Конкретна форма може залежати від етапу виконання польоту або польотного завдання в цілому. Найбільш поширеними конфігураціями рою є лінія, прямокутник, клин і коло. Ці геометричні примітиви є основою для формування роїв зі складнішою геометричною структурою.

Перевагою застосування запропонованого методу є можливість керування роєм, враховуючи можливі моделі руху БПЛА літакового типу [12], що задовольняє вимогу масштабованості (можливість змінювати кількість БПЛА в рої), а також дає змогу формувати різні конфігурації рою. Основним завданням у цьому випадку є формування і керування роєм в цілому, а не контроль над окремими БПЛА. Запропонований метод базується на використанні штучних потенційних полів (APF), які генеруються у віртуальному просторі відповідно до розташування БПЛА, перешкод (статичних та динамічних) та пунктів призначення (цілей). Перевага застосування APF для керування роєм з певною конфігурацією полягає в тому, що такий метод є простим для введення обмежень та цілей для рою. Сили тяжіння та відштовхування є основою для розрахунку вектору безконфліктного напрямку руху кожного БПЛА та рою в цілому. Штучні потенційні

поля використовуються не тільки в класичному сенсі для планування напрямку руху, але також для формування рою БПЛА певної конфігурації під час руху. Поля генерують бажані швидкості і кути напрямку руху для виконання польоту за заданим маршрутом та забезпечують уникнення перешкод в режимі реального часу, при цьому зберігаючи конфігурацію рою. Хоча для методу APF характерна проблема, пов'язана з наявністю локальних мінімумів [13], вектор потенційних полів динамічно змінюється на кожному часовому кроці моделювання, тому шанси на потрапляння в локальні мінімуми значно зменшуються.

Метод APF використовується для визначення вектору безконфліктного напрямку руху БПЛА. Оскільки штучні потенційні поля моделюють природу гравітаційного поля для тяжіння або відштовхування об'єктів, взаємодія з потенційним полем уможливило моделювання взаємодії БПЛА в рої. Штучне силове поле [14], що створюється під впливом всіх об'єктів (БПЛА, цілі, перешкоди), є комбінацією окремих штучних силових полів: F_{dest} — сили, створені ціллю; F_{swarm} — сили, створені конфігурацією рою; F_{obst} — сили, створені статичними і динамічними перешкодами:

$$F = F_{dest} + F_{swarm} + F_{obst} \quad (1)$$

На кожний i -й БПЛА діють штучні сили від j -х БПЛА, сили від цілі та сили від k -х перешкод, тому результуючий вектор включає дію сил тяжіння та відштовхування і таким чином рівняння (1) має повний вигляд:

$$F_i = F_{i_{dest}}^+ + F_{i_{dest}}^- + \sum_{j=1}^n (F_j^+ + F_j^-) + \sum_{k=1}^p (F_k^+ + F_k^-), \quad (2)$$

$$i = 1 \dots n, i \neq j.$$

Сили тяжіння F^+ та відштовхування F^- мають таку форму:

$$F_{ij}^+ = \frac{Gm_i m_j}{R_{ij}^{\bar{b}}}, F_{ik}^+ = \frac{Gm_i m_k}{R_{ik}^{\bar{b}}}, F_{i_{dest}}^+ = \frac{Gm_i m_{dest}}{R_{i_{dest}}^{\bar{b}}}, \quad (3)$$

$$F_{ij}^- = \frac{Gm_i m_j (R_{ikp} + R_{jkp})}{R_{ij}^B}, F_{ik}^- = \frac{Gm_i m_k (R_{ikp} + R_{kcp})}{R_{ik}^B}, \quad (4)$$

$$F_{i_{dest}}^- = \frac{Gm_i m_{dest} (R_{ikp} + R_{dest\ kcp})}{R_{i_{dest}}^B}.$$

У формулах (3) і (4) прийняті такі позначення: m_i , m_{dest} , m_k — віртуальні маси БПЛА, цілі і перешкод відповідно; G — коефіцієнт напруженості штучного силового поля (стала величина); R_{ij} — відстань між центрами мас

БПЛА; R_{ik} — відстань між центрами мас БПЛА і перешкод; $R_{i\ dest}$ — відстань між центрами мас БПЛА і цілі; R_{ikp} , R_{jkp} — критичні радіуси (захисні зони) навколо i -х і j -х БПЛА відповідно; R_{kcp} — критичні радіуси (захисні зони) навколо перешкод; $R_{dest\ cp}$ — критичний радіус навколо цілі; α і β — цілі числа, при чому для забезпечення синергетичного ефекту взаємодії БПЛА в рої необхідно виконання умови $\alpha > \beta$.

Для того, щоб гарантувати досягнення зони призначення кожному i -му БПЛА, необхідно, щоб сила тяжіння, створена ціллю, була більшою за максимальну сумарну силу тяжіння, що генерується іншими БПЛА та перешкодами.

$$F_{i\ dest}^+ > \sum_{j=1}^n F_j^+ + \sum_{k=1}^p F_k^+, \quad i \neq j. \quad (5)$$

В розгорнутому варіанті (5) має вигляд:

$$\frac{Gm_i m_{dest}}{R_{i\ dest}^{\bar{6}}} > \left(\sum_{j=1}^n \frac{Gm_i m_j}{R_{ij}^{\bar{6}}} + \sum_{k=1}^p \frac{Gm_i m_k}{R_{ik}^{\bar{6}}} \right), \quad i \neq j. \quad (6)$$

Після перетворення (6) знаходимо потрібну масу цілі, яка забезпечує цільовий рух усього рою:

$$m_{dest} > R_{i\ dest}^{\bar{6}} \left(\sum_{j=1}^n \frac{m_j}{R_{ij}^{\bar{6}}} + \sum_{k=1}^p \frac{m_k}{R_{ik}^{\bar{6}}} \right), \quad i \neq j. \quad (7)$$

Умова (7) усуває недолік традиційного методу APF [15], пов'язаний з наявністю локальних мінімумів штучних силових полів, та забезпечує гарантоване досягнення зони призначення (цілі). Вектор штучних сил в будь-який конкретний час визначає безконфліктну траєкторію кожного БПЛА, підтримуючи конфігурацію рою.

Рух БПЛА в загальному вигляді може бути надано системою кінематичних рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f(x_i, V_i, \theta_i), \\ \dot{y}_i &= f(y_i, V_i, \theta_i), \end{aligned} \quad (8)$$

де x_i , y_i — координати i -го БПЛА, V_i — заданий вектор швидкості i -го БПЛА, θ_i — курсовий угол i -го БПЛА.

Для того, щоб знайти керування θ_i , необхідно двічі про інтегрувати рівняння:

$$\ddot{x}_i = \frac{1}{m_i} F_{ix}, \quad \ddot{y}_i = \frac{1}{m_i} F_{iy}, \quad (9)$$

де F_{ix}, F_{iy} — проекції на координатні осі віртуальних сил, що діють на i -й БПЛА, розраховані за формулами (3) і (4).

За результатами інтегрування (9) необхідно знайти значення координат, визначених в моменти часу t_1 і t_2 , які відрізняються на крок інтегрування, і підставити в формулу

$$\theta_i = \arctg \left(\frac{y_i(t_2) - y_i(t_1)}{x_i(t_2) - x_i(t_1)} \right). \quad (10)$$

Моделювання. З метою підтвердження можливості застосування MARF для керування роєм БПЛА виконано математичне моделювання в програмному середовищі Matlab. Було проведено 4 експерименти з 4-ма та 5-ю БПЛА з різними конфігураціями та формами рою відповідно. Припускається, що всі БПЛА мають однакову вагу, льотно-технічні характеристики та захисні зони навколо кожного БПЛА. Захисна зона — це зона у вигляді кола із центром, який збігається із центром мас БПЛА. Радіус кола визначає мінімально необхідну відстань для виконання маневру, щоб уникнути зіткнення з іншими БПЛА чи перешкодами. Основним завданням в усіх експериментах було досягнення роєм цільової позиції за умов зберігання роєм певної геометричної форми.

У таблиці 1 надано початкові дані для всіх експериментів. У якості геометричних форм рою були вибрані лінія, прямокутник, клин і коло. Радіус захисної зони кожного БПЛА складав 10 метрів. Початкові координати точок старту БПЛА і їх початковий курс задавався випадковими величинами. Початкова швидкість усіх БПЛА дорівнювала нулю.

На рис. 1, 3, 5, 7 надано БПЛА, які знаходяться на початкових позиціях (зліва) та результат моделювання з часом 1000 секунд із сформованою конфігурацією рою у формі лінії, прямокутника, клину і кола (справа). На рис. 2, 4, 6, 8 показано параметри керування та їх зміна із часом: курс (heading angle θ_i) та швидкість (velocity V_i). Кожному БПЛА присвоєно свій номер (ДППС1...ДППС5).

Таблиця 1. Вихідні дані експериментів

	Кількість БПЛА	Форма рою	Штучна вага БПЛА	Захисна зона БПЛА	Штучна вага зони призначення	Час моделювання	Результати моделювання
Експеримент 1	4	Лінія	1 кг.	10 м	250 кг.	1000 с.	Рис. 1, 2
Експеримент 2	4	Прямокутник	1 кг.	10 м	250 кг.	1000 с.	Рис. 3, 4
Експеримент 3	5	Клин	1 кг.	10 м	250 кг.	1000 с.	Рис. 5, 6
Експеримент 4	5	Коло	1 кг.	10 м	250 кг.	1000 с.	Рис. 7, 8

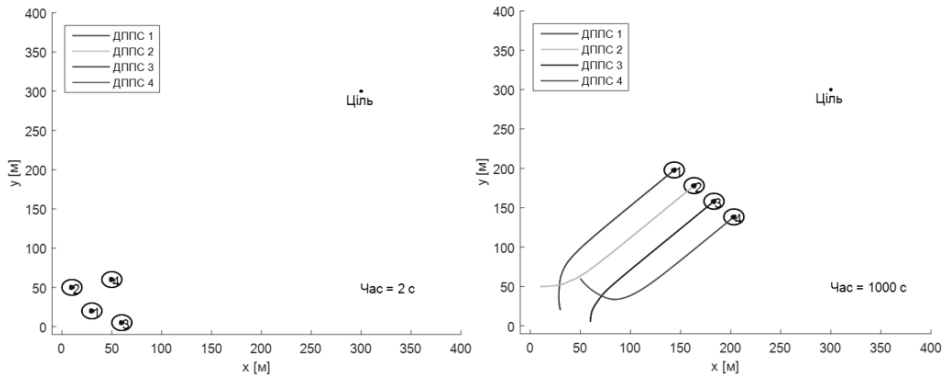


Рис. 1. Формування рою БПЛА у вигляді лінії.

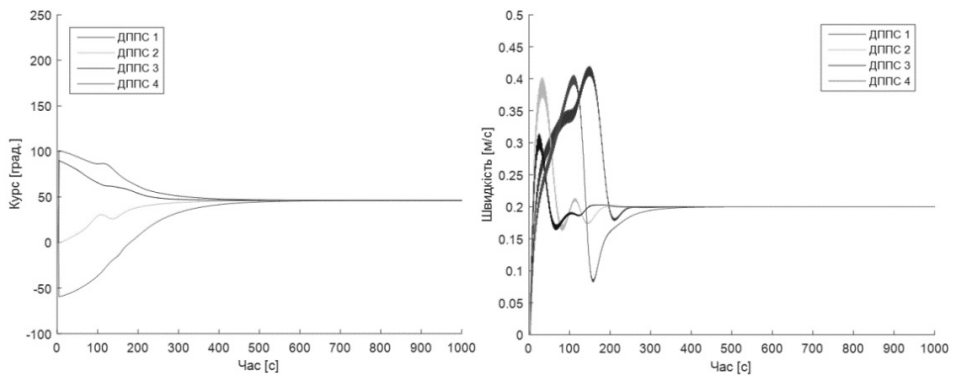


Рис. 2. Параметри керування для формування рою БПЛА у вигляді лінії

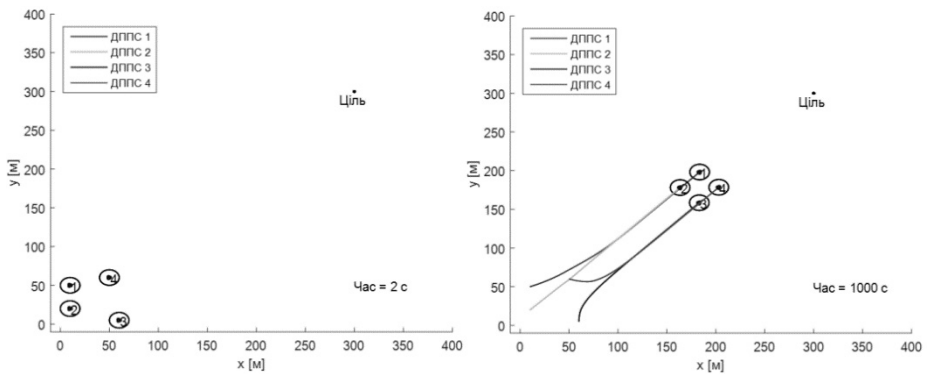


Рис. 3. Формування рою БПЛА у вигляді прямокутника.

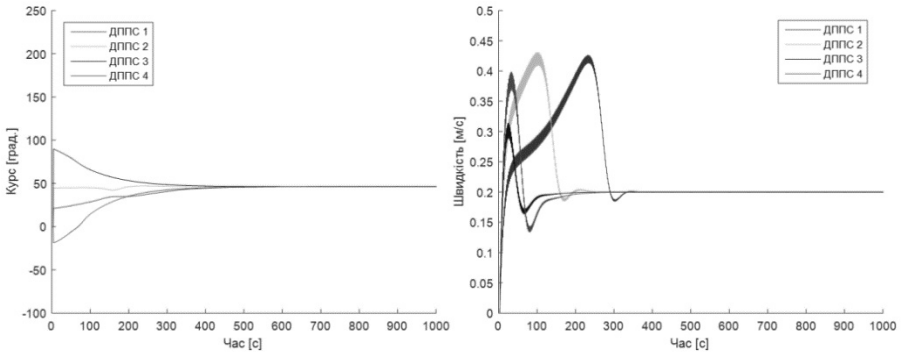


Рис. 4. Параметри керування для формування рою БПЛА у вигляді прямокутника.

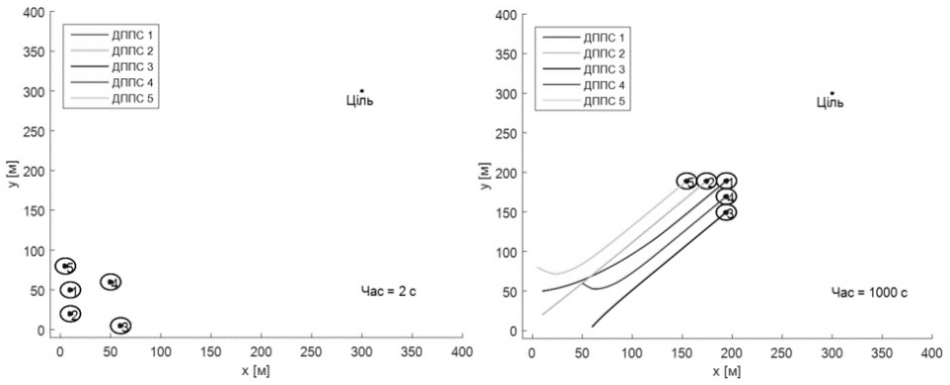


Рис. 5. Формування рою БПЛА у вигляді клину.

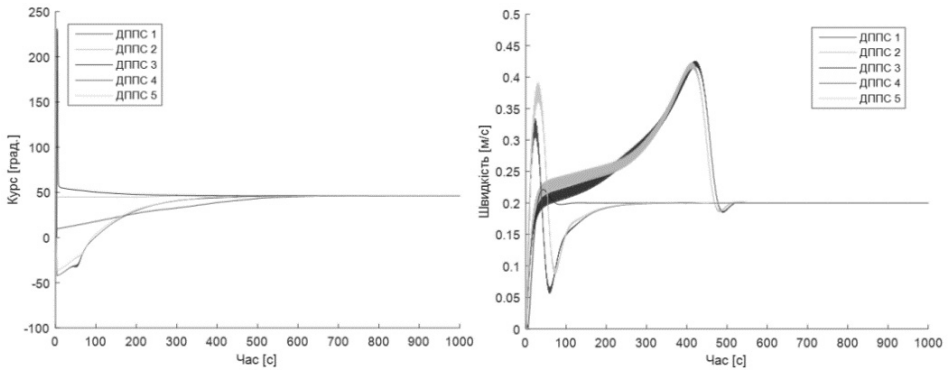


Рис. 6. Параметри керування для формування рою БПЛА у вигляді клину.

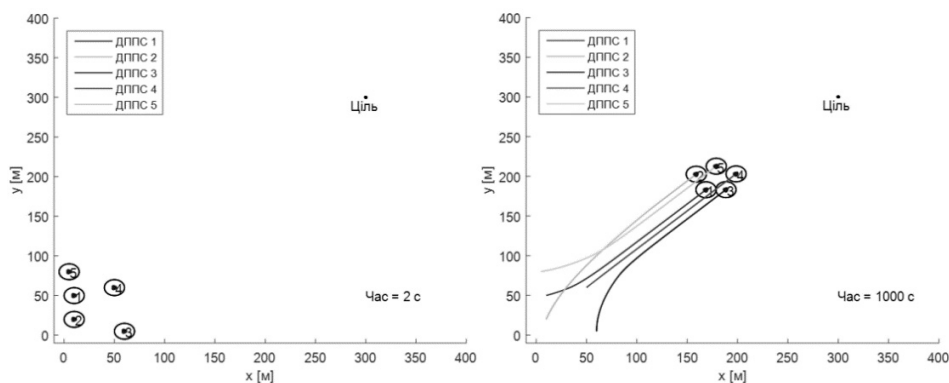


Рис. 7. Формування рою БПЛА у вигляді кола.

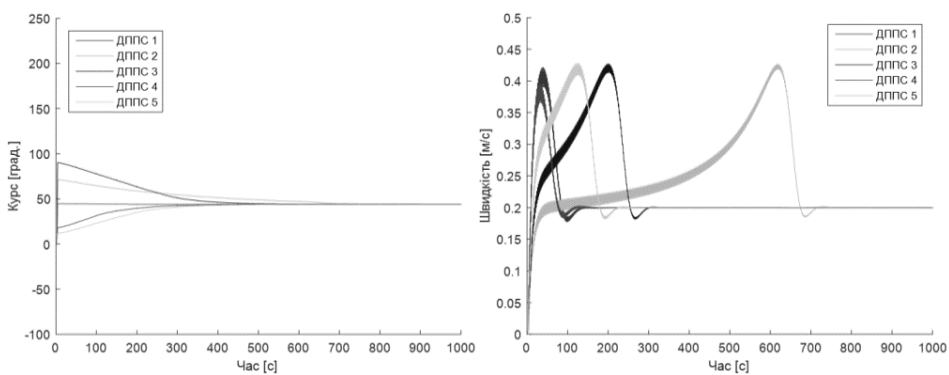


Рис. 8. Параметри керування для формування рою БПЛА у вигляді кола.

Результати моделювання показують, що для всіх чотирьох експериментів спостерігається спочатку швидкий рух БПЛА для формування рою, а потім рух в рої заданої конфігурації до цільової позиції. Після того, як БПЛА займають своє місце в рої, вони рухаються з однаковим курсом і однаковою швидкістю. Місце кожного БПЛА в рої залежить від початкових умов моделювання.

ВИСНОВКИ

Основними перевагами запропонованого методу є відмовостійкість, гнучкість та масштабованість керування роєм БПЛА заданої конфігурації. Цей метод дає змогу формувати і підтримувати конфігурацію рою заданої форми і є адаптивним до різних середовищ. Перевага і відмінність цього підходу в порівнянні з аналогічними полягає у простоті формування вектору керувань, який задає напрямок руху та швидкість кожного БПЛА в рої та напрямок руху всього рою до заданої цільової позиції. Параметри керування легко змінюються і коригуються для конфігурації рою та відносної відстані між учасниками рою, в той час як інші методи не дають можливість вносити набір обмежень або коригувати параметри керування в режимі реального часу.

Запропонований метод добре масштабується та може бути застосовано для керування роєм різних розмірів, також може бути застосований для керування

роєм БПЛА з різними льотними характеристиками, оскільки формування вектора руху не залежить від конкретних технічних характеристик БПЛА, але враховує певні обмеження, для прикладу рух БПЛА літакового типу (на відміну від підходів в [17–18], які масштабуються за розміром, але не за неоднорідністю). Система керування БПЛА отримує сформований вектор у вигляді вхідних даних та переводить його в керувальні сигнали системи керування.

REFERENCES

1. A. Benghezal, R. Louali, A. Bazoula, T. Chettibi. Trajectory generation for a fixed-wing UAV by the potential field method. 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT). Tlemcen. 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/CEIT.2015.7233049
2. Chen, H., Yin, Ch., Xie, L. Automatic Discovery of Subgoals Sequential Decision Problems Using Potential Fields. Conference Paper in Communications in Computer and Information Science. 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-74282-1_66.
3. Y. U. Cao, A. S. Fukunaga, A. B. Kahng. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions. *Autonomous Robots*. 1997. V.4. P. 1–23.
4. H. C. Hsu, A. Liu. Applying a Taxonomy of Formation Control in Developing a Robotic System. IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. 2005. P. 3–10.
5. D. Galzi, Y. Shtessel. UAV formations control using high order sliding modes. American Control Conference. Minneapolis. MN. 2006. P. 6. DOI: 10.1109/ACC.2006.1657386
6. Y. Huang, J. Tang, S. Lao. UAV Group Formation Collision Avoidance Method Based on Second-Order Consensus Algorithm and Improved Artificial Potential Field. *Symmetry* 11(9):1162. 2019. DOI: 10.3390/sym11091162.
7. H. Yin, L. Cam, U. Roy. Formation control for multiple unmanned aerial vehicles in constrained space using modified artificial potential field. *MATHEMATICAL MODELLING OF ENGINEERING PROBLEMS*. 2017. V.4. P. 100–105. DOI: 10.18280/mmep.040207.
8. L. Chaimowicz, V. Kumar. Aerial Shepherds: Coordination among UAVs and Swarm Robots. *International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems* 2004.
9. P. Kostelnik, M. Samulka, M. Janosik. Scalable multi-robot formations using local sensing and communication. *Proceedings of the Third International Workshop on Robot Motion and Control*. 2002. P. 319–324.
10. N. E. Leonard, E. Fiorelli. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. 2001. P. 2968–2973.
11. K. Sugihara, I. Suzuki. Distributed algorithms for formation of geometric patterns with many mobile robots. *Robot Systems*. 1996. V. 13.
12. M. Fields. Modeling large scale troop movement using reaction diffusion equations U.S. Army Research Laboratory. 1993.
13. Y. Koren and J. Borenstein. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* 1991.
14. Ch. Huang, W. Li, Ch. Xiao, B. Liang, S. Han, Songchen. Potential field method for persistent surveillance of multiple unmanned aerial vehicle sensors. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 14. 2018. DOI: 10.1177/1550147718755069.
15. V. Kharchenko, V. Chepizhenko, S. Pavlova. Synergy of Piloted, Remotely Piloted and Unmanned Air Systems in Single Air Navigation Space. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1502.8885.
16. I. Skyrda. Decentralized Autonomous Unmanned Aerial Vehicle Swarm Formation and Flight Control. *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications*. 14th International Conference, ICTERI 2018. Kyiv, Ukraine, May 14-17, 2018, Revised Selected Papers. 2018. P. 197–219. DOI 978-3-030-13929-2

17. W. Kang, N. Xi, Y. Zhao, J. Tan, Y. Wang. Formation control of multiple autonomous vehicles: Theory and experimentation. Proceedings of IFAC 15th Triennial World Congress. 2002.
18. N. Leonard, E. Fiorelli. Leaders, artificial potentials and coordinated control of groups. Conference on Decision and Control. 2001.

Received 12.01.2023

*Chepizhenko V.I.*¹, DSc (Engineering), Senior Researcher,
Leading Researcher of the Intelligent Control Department.
<https://orcid.org/0000-0001-8797-4868>, e-mail: chepizhenko.valeriy@gmail.com
*Pavlova S.V.*², DSc (Engineering), Professor,
Professor of School of Software
<https://orcid.org/0000-0002-6256-5248>, e-mail: pavlova_2020@ukr.net
*Skyrda I.I.*³, PhD (Engineering),
Aviation Communication, Navigation and Surveillance expert (CNS expert)
<https://orcid.org/0000-0002-9363-8921>, e-mail: skyrda2@gmail.com

¹ International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Ministry of Education and Science of Ukraine.

40, Akad. Glushkov ave., Kyiv, 03187, Ukraine.

² Shanxi Agricultural University

81, Longcheng str., Xiaodian Taiyuan, Shanxi, 030031, China.

³ EUROCONTROL

96, Rue de la Fusée, Brussels, 1130, Belgium

TRAJECTORY MOVEMENT CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN A SWARM

Introduction. Today, the use of swarms of unmanned aerial vehicles (UAVs) is effective for solving the tasks of monitoring large areas of the earth's surface and infrastructure objects, processing large areas of agricultural land, digital mapping, designing land objects in 3D, planning and designing construction works, road surface monitoring, etc. An important issue here is the potential for simultaneous conflicts between unmanned aerial vehicles moving in a swarm.

The purpose of the paper is to develop a scalable, flexible method of controlling the trajectory of unmanned aerial vehicles in a swarm based on the approach of artificial potential fields.

The results. The developed method has properties of scalability and flexibility. The method contains a simple control algorithm, that allows several UAVs to fly as part of a swarm along a given trajectory, while solving the task of resolving conflict situations (preventing collisions between swarm members and with static and dynamic obstacles). The proposed method consists in decentralized real-time management of the swarm. The simulation results show that the method, presented in the article, increases the efficiency of swarm formation and flight performance, as well as UAV collision avoidance.

Conclusions. The proposed method scales well and is suitable for controlling a swarm of different sizes, it can also be applied to control a swarm of UAVs with different flight characteristics, since the formation of the resulting motion vector does not depend on the specific technical characteristics of the UAV, but takes into account certain limitations.

Keywords: unmanned aerial vehicle, control method, modified artificial potential fields, UAV swarm, collision avoidance.