

Л.М. Артющин, О.А. Кононов, Ю.О. Невзгляденко

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

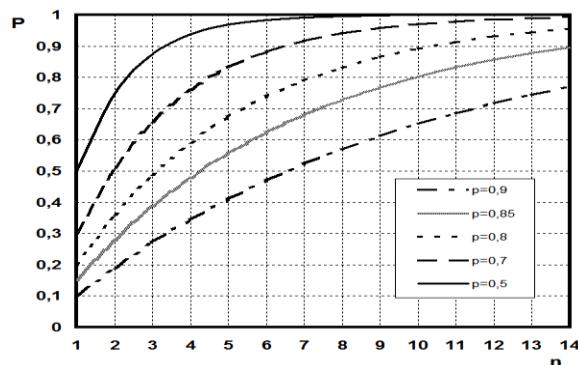
АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ РЕАЛІЗАЦІЇ ГРУПОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті розглядається проблематика реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) військового призначення – перспективного формату забезпечення високої ймовірності виконання поставлених бойових завдань за умов активної протидії противника. Розглядається функціонування групи БпЛА військового призначення у системі “група БпЛА – засоби протидії противника – ціль застосування – середовище”. Аналізується можливість формування управління груповим застосуванням БпЛА військового призначення у межах методів сучасної теорії управління та застосування технологій штучного інтелекту. Виділяються важливі недоліки та обмеження розглянутих підходів формування управління групою БпЛА військового призначення. Обґрунтовується перспективність комбінування методів сучасної теорії управління та технологій штучного інтелекту для створення системи управління груповим застосуванням БпЛА військового призначення.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, групове застосування безпілотних літальних апаратів військового призначення, управління, ймовірність виконання бойового завдання, технології штучного інтелекту, протидія противника.

Вступ

Постановка проблеми. Зростання значення військового застосування БпЛА – незаперечна й очевидна сучасна тенденція, а їх сумісне застосування – це важливий спосіб підвищення ймовірності успішного виконання бойових завдань, що поставлені. Якщо існує p – ненульова ймовірність події, що засобами протиповітряної оборони (ППО) противника буде вражений один БпЛА, то забезпечити необхідну ймовірність успішного виконання бойового завдання P можливо, або збільшенням кількості одночасно застосованих апаратів n та (або) зменшенням p : $P(p, n) = 1 - p^n$. При цьому існує можливість забезпечити ймовірність успішного виконання поставленого бойового завдання більше, ніж $P(p, n)$ (рис. 1).

Рис. 1. Залежність $P(p, n)$.

Джерело: [1].

Збільшити ефект від застосування окремих БпЛА можливо, скоординувавши їх дії на досягнення спільної мети – реалізував групове застосування.

У цій статті під груповим застосуванням розуміється сумісне, чітко скоординоване відносно цілі функціонування декількох БпЛА, можливо з різними льотно-технічними характеристиками, спеціалізацією, траєкторіями руху.

Створення комплексів групового застосування БпЛА дасть змогу:

підтримувати стійкий канал зв'язку й передачі інформації з наземним пунктом управління навіть при сильній протидії противника (дасть змогу забезпечити повну спостережуваність та керованість групи);

оперативно змінювати функціонування апаратів групи залежно від дій ППО противника;

гарантовано вибірково дистанційно вражати добре захищені цілі (у тому числі мобільні).

Рівень сучасної технологічної бази принципово дає змогу реалізувати ідею сумісного бойового застосування великої кількості БпЛА. Для її результативної реалізації є усі необхідні компоненти: безпілотні авіаційні платформи, засоби зв'язку, передачі, отримання та обробки інформації. Але в авторів немає інформації про прийняття на озброєння у світі комплексів групового застосування БпЛА.

На сьогодні розробки в цьому напрямі знаходяться на рівні експериментальних дослідницьких проєктів (наприклад, проєкти

GREMLINS [2, 3], Perdix [2, 4, 5] та намагання сумісного застосування декількох окремо керованих БпЛА, що є підтвердженням існування проблеми реалізації групового застосування БпЛА військового призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Посилений інтерес до безпілотної авіаційної техніки виражається у різкому збільшенні кількості різних досліджень та публікацій.

Вивчення наукових праць у галузі сумісного (групового) застосування БпЛА (достатньо повну англійську бібліографію наведено в [9...11], українську – в [1, 2, 13, 19, 20]) дає змогу виділити такі характерні особливості:

в даному напрямі досліджень ще не сформувалась стійка термінологія. Під груповим застосуванням різні автори розуміють різні сутності, з іншого боку, поняття “група БпЛА” (group UAV) доволі часто має різні синоніми: “рій” (rovy), “стая” (swarm), “стрій” (order);

частина публікацій безпосередньо присвячена груповому застосуванню БпЛА як основному предмету досліджень (наприклад, [2, 6, 8, 9]). В іншій частині (наприклад, [10, 11, 13...17]) групове застосування БпЛА розглядається тільки як об’єкт для ілюстрації працездатності запропонованих авторами рішень;

загальноприйнятим є розуміння, що реалізація групового застосування БпЛА військового призначення безпосередньо залежить від створення відповідної системи управління;

більшість публікацій містить часткові результати за вузькими напрямками спільного (групового) застосування БпЛА (наприклад, [12...15]), дуже мала частина публікацій присвячена узагальненню та аналізу. Фактично немає публікацій з детальним аналізом перспектив реалізації групового застосування БпЛА військового призначення.

Мета статті полягає у викладенні результатів оцінки авторами перспектив прикладного рішення завдання формування керування групою БпЛА військового призначення, а саме завдання [1]:

для системи “група БпЛА – засоби протидії противника – ціль застосування – середовище”, яка задана рівняннями зміни фазового стану та вимірювань у формі Ланжевена:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(t) \cdot X(t) + B(t) \cdot U(t) + \xi(t), \\ Z(t) = H(t) \cdot X(t) \end{cases}, \quad (1)$$

де $X(t)$ - m -мірний вектор стану системи, $X(t) \in \Omega_X$; $Z(t)$ - l -мірний вектор вимірювань, $Z(t) \in \Omega_Z$; $U(t)$ - r -мірний вектор керування, $U(t) \in \Omega_U$; $\xi(t)$ - m -мірний вектор протидії противника, $\xi(t) \in \Omega_\xi$; $A(t)$ - динамічна матриця

системи розмірністю $m \times m$; $B(t)$ - матриця керування розмірністю $m \times r$; $H(t)$ - матриця спостережень розмірністю $m \times l$; $t \in [t_0, t_k]$ - часовий інтервал функціонування системи; необхідно побудувати таку систему керування $U(t)$, яка буде здатна забезпечити максимальну ймовірність досягнення необхідного фазового стану системи $X(t) \in \Omega_X^*$ для всіх можливих дій противника $\xi(t) \in \Omega_\xi$:

$$U(t) : \min_{\xi(t) \in \Omega_\xi} \max_{U(t) \in \Omega_U} P(X(t) \in \Omega_X^*), \quad (2)$$

з дотриманням стохастичної (ймовірнісної) умови:

$$P(X(t) \in \Omega_X^*) > 1 - p^n. \quad (3)$$

Умова (3) висловлює вимогу одержання додаткового ефекту, емерджентності від взаємодії апаратів у групі у порівнянні із застосуванням такої ж кількості окремих БпЛА.

Завдання (1...3) відноситься до класу сучасних завдань стохастичної оптимізації управління складними розподіленими системами в умовах протидії, апіорної невизначеності та жорстких ймовірнісних обмежень.

Виклад основного матеріалу

Теорія керування вказує на можливість успішного розв’язання завдання (1...3). Дійсно, при дотриманні умов повної спостережуваності та керованості системи:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} B & A \cdot B & A^2 \cdot B & \dots & A^{m-1} \cdot B \end{bmatrix} = m, \quad (4)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} H^T & A^T H^T & (A^T)^2 H^T & \dots & (A^T)^{m-1} H^T \end{bmatrix} = m; \quad (5)$$

наявності достатньої кількості БпЛА для виконання бойового завдання, що поставлено;

існуванні “прийнятної” сідлової точки можливих стратегій базису $U(t)$, $\xi(t)$ (обмеженості множини дій противника Ω_ξ);

задача (1...3) повинна мати нетривіальне розв’язання.

Це означає теоретичну можливість побудови ефективної системи управління груповим застосуванням БпЛА військового призначення.

Важливо відзначити, що вдосконалення бортової та наземної апаратури, льотно-технічних можливостей БпЛА не є перспективним напрямом розв’язання задачі (1...3). Спроби подолати апіорну невизначеність за рахунок встановлення досконалих засобів збору інформації про супротивника, спроби подолати протидію шляхом удосконалення засобів зв’язку (передачі інформації) і, таким чином, звести рішення задачі (1...3) до

традиційних завдань синтезу траєкторного управління, не здатні принести очікуваного результату.

Принципова відкритість для дій противника системи “група БПЛА – засоби протидії противника – ціль застосування – середовище” надає можливість нівелювати технічні переваги групи і відновити баланс умов завдання (1...3).

При цьому, варто зазначити, що саме тактико-технічні можливості БПЛА групи та наземного обладнання визначають їх бойові можливості та є основою для створення результативних систем управління груповим застосуванням.

Найбільш розроблений методологічний підхід до побудови системи управління груповим застосуванням БПЛА заснований на формуванні силових впливів $f(t)$ і, при всьому різноманітті форм реалізації, характеризується такими загальними рисами [6...11]:

як моделі групового застосування БПЛА розглядаються різні інтерпретації рівняння Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial V}{\partial x_i} + \frac{\partial R}{\partial \dot{x}_i} = f_i(t), \quad (6)$$

де $T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k M_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j$ - кінетична енергія;

$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j} \right) x_i x_j$ - потенційна енергія;

$R = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \eta_{ij} \dot{x}_i \dot{x}_j$ - дисипативна енергія системи;

x_i, x_j - компоненти вектора $X(t)$;

розглядають критерії оптимізації керування, які описують просторово-часові та енергетичні властивості системи “група БПЛА – засоби протидії противника – ціль застосування – середовище”:

$$J(X, t) = Q(X(t_k)) + \int_{t_0}^{t_k} L(X(t), t) dt, \quad (7)$$

де $Q(...)$ і $L(...)$ - деякі векторні функції, $Q(X(t_k)) \neq 0$, $L(X(t), t) \neq 0$;

формується сепарабельне керування як добуток матричного коефіцієнту посилення $\Lambda(X, t)$ і вектору оцінки стану системи $\hat{X}(t)$:

$$U(t) = \Lambda(X, t) \cdot \hat{X}(t); \quad (8)$$

широко застосовується лінеаризація, декомпозиція складної системи на простіші підсистеми, побудова ієрархічної централізованої структури системи управління.

У межах цього підходу формування управління групою БПЛА (1...3) передбачає послідовне рішення трьох рівнів задач (рис. 2), коли

результати рішення задач верхнього рівня є початковими умовами для вирішення задач нижнього рівня. Слід зазначити, що це основні рівні обробки інформації у системі управління групою. Можлива їх подальша конкретизація та уточнення. На кожному рівні можуть застосовуватись свої часткові моделі та відповідні їм методи.

Для подолання складнощів, що викликані наявністю умов апіорної невизначеності бойового застосування групи, на першому етапі визначається такий кількісний та якісний склад БПЛА групи, щоб він був спроможним гарантувати виконання умови (3) за всіх можливих дій противника:

$$n^* = \inf_n \left(\left(P(X(t) \in \Omega_X^*) \right) > 1 - p^n \right). \quad (9)$$

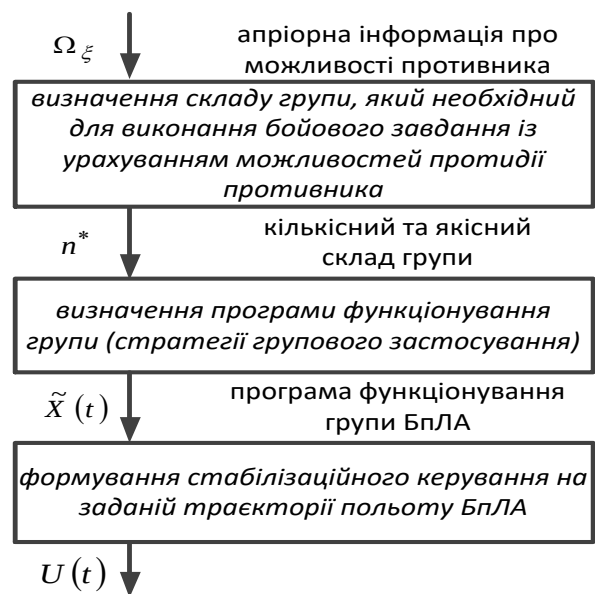


Рис. 2. Схема основних рівнів формування управління групою БПЛА військового призначення у рамках підходу (6-8).

Джерело: розроблено авторами.

Залежно від виду наявної інформації про сили, засоби та очікувані дії противника можливі різні варіанти постановки задачі визначення складу групи.

Для їх вирішення, як правило, використовуються методи теорії ймовірностей та математичного програмування. Достатньо повну бібліографію досліджень у цьому напрямі наведено у [6...9]. Визначення необхідного складу групи розглядається також при формуванні управління БПЛА цивільного призначення. У цьому випадку враховується не протидія противника, а вплив випадкових чинників із апіорно відомими ймовірнісними характеристиками. Ігрові постановки завдань визначення складу групи для випадку цивільного застосування БПЛА, як правило, не розглядаються.

Наступний рівень формування управління групою БпЛА полягає у визначенні для заданого складу групи n^* програми функціонування (стратегії застосування) $\tilde{X}(t)$, виконання якої дасть змогу досягти бажаного результату при можливій протидії противника $\xi(t) \in \Omega_\xi$:

$$\tilde{X}(t) : \min_{\xi(t) \in \Omega_\xi} \max_{U(t) \in \Omega_U} P(X(t_k) \in \Omega_X^*). \quad (10)$$

Наявність умов протидії та випадковостей визначає доцільність застосування методів стохастичної оптимізації, варіаційного обчислення, динамічного програмування, умовної оптимізації та теорії ігор для вирішення завдань (10).

Слід зазначити, що цей рівень формування управління групою БпЛА є специфічним, притаманним галузі військового застосування, і тому, не має цивільного аналогу. Частково результати досліджень у цьому напрямі проаналізовано у [5].

Логіка декомпозиції завдання (1...3) у межах підходу (6...8) полягає у подоланні у першому етапі складнощів, що пов'язані з наявністю апріорної невизначеності, і подоланні на другому етапі складнощів, що пов'язані з можливою протидією противника. Для цього широко використовуються лінеаризовані моделі, які отримані спрощенням рівняння (6).

Визначення програми функціонування групи $\tilde{X}(t)$ дає змогу перейти до формування стабілізуючого керування, яке мінімізує вимушене відхилення від заданої фазової траєкторії:

$$U(t) : \min \left(\int_{t_0}^{t_k} (\tilde{X}(t) - X(t)) \beta (\tilde{X}(t) - X(t))^T dt \right). \quad (11)$$

Завдання стабілізації траєкторного руху БпЛА є добре вивченими, бібліографію у цій галузі наведено у [6, 7, 9, 12, 13]. Цей аспект реалізації групового застосування БпЛА має реальні форми практичної реалізації – автопілоти різного рівня досконалості.

Незважаючи на детермінованість управління і результати застосування, що дуже важливо для такого об'єкта управління, як група БпЛА військового призначення, підхід (6...8) має істотний недолік.

Усі переваги групового застосування БпЛА ґрунтуються на використанні нелінійних властивостей спільного функціонування, узгодженої взаємодії апаратів у групі. Нелінійність властивостей є тим фактором, який визначає виникнення нової якості, яка кардинально відрізняє групове застосування від застосування великої кількості одиночних БпЛА. Якщо при застосуванні

окремих БпЛА дотримується принцип суперпозиції (результат реакції на суму впливів відповідає сумі реакцій на кожну дію окремо), то у разі групового застосування цей принцип не дотримується. Тому врахування нелінійних особливостей групового застосування БпЛА є необхідним елементом адекватного розв'язання завдання (1...3).

Прагнення абстрагуватися від нелінійних особливостей під час формування управління у випадку реалізації підходу (6...8) суперечить цій умові.

Спроби лінеаризувати істотно нелінійний процес взаємодії апаратів у групі за рахунок збільшення кількості рівнів ієрархії обробки інформації, точності лінійної моделі лише “ускладнюють” систему управління, але нездатні у принципі подолати зазначений недолік.

У результаті всі рішення, отримані в межах цього підходу, будуть програвати рішенням, отриманим без застосування лінеаризації та спрощень.

Принципову відмінність від традиційного підходу (6...8) має підхід, заснований на використанні досягнень сучасних інформаційних технологій, насамперед, технологій штучного інтелекту.

При всій різноманітності конкретних реалізацій цей підхід характеризується:

відсутністю лінеаризації, ієрархічних централізованих процесів формування управління, сепарабельного управління (8), силових моделей, що зводяться до (6);

застосуванням дискретних холистичних (цілісних) моделей та евристичних алгоритмів обробки інформації та формування управління.

Якщо в межах підходу (6...8) застосовуються методи теорії автоматичного управління, теорії автоматизованих систем та теорії ймовірностей, які пов'язані із стохастичними інтегро-диференціальними моделями, то нові інформаційні технології використовують методи дискретної математики та моделі у вигляді відносин між множинами, символіні, графові моделі, моделі у вигляді нейронних мереж, кінцевих автоматів та багатоагентних мереж.

Пошук вирішення завдання управління групою БпЛА при застосуванні нових інформаційних технологій кардинально відрізняється від того, що реалізується в межах підходу (6...8).

У межах цього підходу управління групою формується деякою формою $F(\dots)$ (нейронною мережею певного виду, символічною моделлю тощо), реакції якої на оцінку стану $\hat{X}(t)$ визначаються множиною деяких параметрів $\{K\}$ (коефіцієнтів посилення нейронної мережі,

множини правил поведінки автономних агентів тощо), що визначають досягнення бажаної якості керування (3):

$$U(t) = F(\{K\}, \hat{X}(t)). \quad (12)$$

Залежно від виду форми $F(\dots)$, множини $\{K\}$ розглядаються різні варіанти формування керування $U(t)$.

Останні результати в галузі застосування мультиагентних систем та нейронних мереж для керування автономними робототехнічними засобами наведено у [14...17].

Слід зазначити, що всі евристичні рішення, які отримані застосуванням технологій штучного інтелекту:

не гарантують знаходження найкращого рішення (відсутні повні обґрунтування оптимальності сформованого управління);

не гарантують знаходження адекватного управління, навіть якщо воно наперед існує (можлива “втрата цілі”);

не гарантують повторюваності реакції в тих самих умовах;

можуть видавати неправильні рішення у деяких випадках.

Незважаючи на кращі можливості реалізації нелінійних особливостей групового застосування та побудови гнучких децентралізованих систем управління апаратами групи, застосування тільки технологій штучного інтелекту не дає змоги гарантувати очікувану високу ймовірність виконання бойових завдань, особливо в умовах протидії “розумного” супротивника.

Відсутність гарантії детермінованого результату при реалізації евристичних рішень є суттєвим обмеженням практичної реалізації у військовій сфері всіх напрацювань у межах технологій штучного інтелекту.

Прагнення подолати недоліки підходу (6...8) та нових інформаційних технологій призвело до розвитку комбінованого підходу, в якому дослідники намагаються поєднати переваги детермінованих методів автоматичного управління та евристичних методів теорії штучного інтелекту, компенсуючи їх недоліки.

Для цього планується застосувати евристичні методи на рівнях формування вектору керування групою, де присутня апріорна невизначеність та неструктурована інформація (рис. 2) та застосувати детерміновані методи автоматичного управління там, де доцільно розглядати лінеаризовані моделі й чітко визначені критерії.

Просте шаблонне об'єднання методів різних підходів при синтезі управління групою БПЛА не завжди приносить очікувані результати. Часто отримують локальні рішення, де позитивний

результат композиції різних методів вдається забезпечити лише у досить вузькому діапазоні умов застосування. Як наслідок, управління може синтезуватися без урахування нелінійних особливостей групового застосування, а нічим не обмежені евристичні рішення можуть бути хибними.

Як приклад складності узгодження різних підходів до синтезу управління груповим застосуванням БПЛА слід зазначити:

складність узгодження централізованої та децентралізованої схем управління в межах єдиної системи управління;

складність розподілу функцій управління групою БПЛА між оператором (операторами) та автоматичними пристроями (підсистемами).

Таким чином, головною складністю застосування “комбінованого” підходу до вирішення завдання (1...3) є узгодження різних методів у рамках єдиної процедури формування управління у широкому діапазоні умов функціонування системи (1).

Варто відзначити такі важливі дослідження щодо комбінування різних методів для забезпечення необхідної якості управління групою БПЛА військового призначення:

роботи [18...20], у яких автори пропонують людино-машинні технології управління групою БПЛА військового призначення. Ці дослідження спрямовані на обмеження евристики інформаційних технологій шляхом залучення до формування управління групою БПЛА людини-оператора;

роботи [21...25], де описані методи побудови досконалих нелінійних регуляторів шляхом знаходження компромісу між гнучкістю нейронних мереж та детермінованістю традиційних автоматів.

Висновки

Головним об'єктивним обмеженням реалізації групового застосування БПЛА військового призначення є відсутність систем управління, здатних забезпечити необхідну якість.

Завдання формування управління групою БПЛА військового призначення відноситься до класу сучасних наукових завдань стохастичної оптимізації в умовах протидії та апріорної невизначеності.

Основну складність формування управління групою БПЛА військового призначення у межах підходу (6...8) становить адекватне врахування та використання нелінійних властивостей і особливостей групи як об'єкта управління.

Важливим обмеженням можливості формування управління групою БПЛА військового призначення шляхом застосування нових інформаційних технологій (методів штучного

інтелекту) є евристичність та недетермінованість результатів дій групи БПЛА.

Найбільші перспективи має комбінований підхід, що поєднує переваги як традиційного підходу (6...8), так і нових інформаційних

технологій, але компенсує їх недоліки. На думку авторів, розвиток ідеї комбінування різних методів формування управління є доцільним напрямом **подальших досліджень** щодо реалізації групового застосування БПЛА військового призначення.

Список літератури

1. Kharchenko O.V., Artushin L.M., Kononov O.A. Prospects for the Joint Use of Unmanned Aerial Vehicles // 36. наук. праць ДНДІА. – 2022. – № 18(25). – С. 7–13. DOI: 10.54858/dndia.2022-18-1.
2. Лупандін В. А., Мегельбей Г. В., Мацько О. Й., Куртсеїтов Т. Л., Міроненко П. О. Основні тенденції створення та застосування груп безпілотних літальних апаратів. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2019. № 2(35). С. 88–96. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.11>.
3. DARPA, Dynetics move Gremlins focus to aerial recovery. <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/darpa-dynetics-move-gremlins-focus-to-aerial-recovery>.
4. Project Perdix. www.mit.edu. Beaver Works. Archived from the original on 2017-01-12. Retrieved 14 January 2017. <https://beaverworks.ll.mit.edu/CMS/bw/projectperdixcapstone>.
5. Department of Defense Announces Successful Micro-Drone Demonstration [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.defense.gov/News/News-Releases/News-Release-View/Article/1044811/departament-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration>.
6. Моисеев В.С. Групповое применение беспилотных летательных аппаратов: монография. – Казань: Редакционно-издательский центр “Школа”, 2017. – 572 с.
7. Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
8. Абросимов В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. - М.: Litres, 2017. – 413 с.
9. Tsourdos A., White B., Shanmugavel M. Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles: monograph, John Wiley & Sons, 2011. – 187 p.
10. Kozlovski K.R. Robot Motion and Control: monograph, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 462 p.
11. Asama H., Fukuda T., Arai T., Endo I. Distributed Autonomous Robotic Systems 2: monograph, Springer Japan, 1996.- 442 p.
12. Миклуха В. О., Хімчик Н. В. Оптимізація траєкторії польоту безпілотного літального апарату. Traektoria Nauki. 2017. Vol. 3, No 9. P. 1009-1015. <https://doi.org/10.22178/pos.26-5>.
13. Тимошин Ю., Шевченко М. Intellectual control system for a group of mobile robots. Адаптивні системи автоматичного управління. 2021. № 2(39). С. 106-114. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.39.2021.247420>.
14. Trystan A., Hurin I., Matiushchenko O. Multi-Agent group application model of unmanned aircrafts and unmanned ground vehicles during special mission execution. CEUR Workshop Proceedings. 2021. P. 154–164.
15. Гурін І.О., Трофимов І.М., Гурін О.М. Переваги застосування мультиагентного підходу при управлінні групою безпілотних літальних та наземних апаратів. Current issues of science, prospects and challenges: II International Scientific and Theoretical Conference collection of scientific papers SCIENTIA (Sydney, Australia), 10 червн. 2022 р. Vol. 1, 2022. С. 111–114. <https://doi.org/10.36074/scientia-10.06.2022>.
16. Tongtong Chen, Fuyong Wang, Meiling Feng, Chengyi Xia, Zengqiang Chen, Fully distributed consensus of linear multi-agent systems via dynamic event-triggered control, Neurocomputing, Volume 569, 2024, 127129, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.127129>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231223012523>).
17. Khudov N., Oleksenko O., Lukianchuk V., Herasymenko V., Yaroshenko Y., Ishchenko O., Ikaiev D., Golovchenko O., Volobuiev A., Drob Y., Solomonenko Y., Khizhnyak I. The determining the flight routes of unmanned aerial vehicles groups based on improved ant colony algorithms. The determining the flight routes of unmanned aerial vehicles groups based on improved ant colony algorithms. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2021. Vol. 11, Issue 9. P. 23–32. https://doi.org/10.46338/ijetae0921_03.
18. Артюшин Л.М., Лобанов А.А., Коваль В.В. Математична модель побудови бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К.: НУОУ, 2021. - № 2(41). – С. 23–30.
19. Артюшин Л.М., Герасименко В.В., Коваль В.В. Метод формування спільної авіаційної групи // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К.: НУОУ, 2021. - № 1(40). – С. 63–68.
20. Артюшин Л.М., Кононов О.А., Герасименко В.В., Наусенко Б.Ю. Метод вибору варіанта реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К.: НУОУ, 2022. – №1(43). – С. 48–59.
21. X. -A. Wang, G. -J. Zhang, B. Niu, D. Wang and X. -M. Wang, "Event-Triggered-Based Consensus Neural Network Tracking Control for Nonlinear Pure-Feedback Multiagent Systems With Delayed Full-State Constraints," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, DOI: 10.1109/TASE.2023.3341845.
22. Y. Wang, G. Duan and P. Li, "Event-Triggered Adaptive Sliding Mode Control of Uncertain Nonlinear Systems Based On Fully Actuated System Approach," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, DOI: 10.1109/TCSII.2024.3353316.

23. S. Chu and N. Li, "Distributed Composite Learning Adaptive Fault-Tolerant Control for Multiple Marine Vehicles With Event-Triggered Communication" in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, DOI: 10.1109/TITS.2023.3340746.

24. F. Wang, H. Shan, Z. Chao, G. Yali, W. Qiaoling "Prescribed-time event-triggered fault-tolerant formation control of multiple UAVs under tracking error constraints" in International Journal of Control, doi: 10.1080/00207179.2024.2302042.

25. Shiyi Wang, Zhiru Cao, Chen Peng, Kaiqun Zhu, H ∞ containment control for multi-unmanned aerial vehicle systems: A self-triggered control scheme, Journal of the Franklin Institute, Volume 361, Issue 2, 2024, Pages 572-582, ISSN 0016-0032, <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2023.12.029>.

Надійшла до редколегії 12.12.2023

Схвалена до друку 28.12.2023

Відомості про авторів:

Артюшин Леонід Михайлович

доктор технічних наук
професор
головний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7488-7244>

Кононов Олексій Анатолійович

доктор технічних наук
доцент
заступник начальника
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2267-9109>

Невзгляденко Юрій Олексійович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6972-7871>

Information about the authors:

Leonid Artushin

Doctor of Technical Sciences
Professor
Chief Research
of State Research Institute of Aviation
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7488-7244>

Oleksiy Kononov

Doctor of Technical Sciences
Associate Professor
Deputy Chief
of State Research Institute of Aviation
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2267-9109>

Yurii Nevzgliadenko

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6972-7871>

ANALYSIS OF PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF GROUP APPLICATION OF UNMANNED AIRCRAFT FOR MILITARY PURPOSES

L. Artushin, O. Kononov, Y. Nevzgladenko

The problems of implementing the group use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for military purposes - a promising format for ensuring a high probability of completing assigned combat missions in conditions of active enemy opposition is discussed in the article. In this article, group application is understood as compatible, clearly coordinated with respect to the purpose of operation of several UAVs, possibly with different flight and technical characteristics, specialization, trajectories of movement. Group application is the most common format of UAV application. It also includes the use of combat formations of UAVs. The formation of control over a group of military UAVs is considered as a stochastic optimization problem under conditions of counteraction and a priori uncertainty. The functioning of a military UAV group is considered in the system "UAV group – enemy countermeasures – target of use – environment". The purpose of the article is to present the results of the authors' assessment of the prospects for an applied solution to the task of forming a group of military-purpose UAVs. The basic patterns of functioning of a group of UAVs as a control object are considered without specifying the flight and technical properties of the vehicles, types of combat missions, conditions of combat use, characteristics of enemy countermeasures. The possibility of forming control for the group use of military UAVs is analyzed within the framework of the main methodological approaches: the use of linearized models and hierarchical centralized structures of control formation, the use of new information technologies and artificial intelligence technologies. The main results of implementing control over the group use of UAVs obtained within the framework of these approaches are analyzed. Important shortcomings and limitations of the considered approaches to forming control over a group of UAVs for military purposes are highlighted. The prospects for combining different methods to build an adequate control system for the group use of military UAVs are substantiated.

Keywords: unmanned aerial vehicles, group use of combat unmanned aerial vehicles, control probability of fulfilling the combat mission, artificial intelligence technologies, enemy opposition.