

<https://doi.org/10.15407/csc.2024.01.027>
УДК 623.746-519; 656.7.022; 656.7.05

О.Є. ВОЛКОВ, канд. техн. наук, старший дослідник, директор,
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України,
03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 40, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5418-6723>,
e-mail: alexvolk@ukr.net

В.М. СІМАХІН, аспірант, с.н.с. лабораторія. Безпілотних комплексів і систем,
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України,
03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 40, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4497-0925>,
e-mail: thevladsima@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЯ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ ЗА УМОВ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ

Керування рухом літальних апаратів традиційного пілотованого типу та безпілотних літальних апаратів має багато відмінностей, які напряму впливають на процес вирішення конфліктних ситуацій. Проблема вирішення конфліктних ситуацій за участі літальних апаратів різних типів є актуальною у зв'язку зі стрімким розвитком безпіотної авіації та розширення сфер її застосування. В роботі пропонується технологія керування безпілотним літальним апаратом за умов конфліктних ситуацій, яка дає змогу виконувати оптимізацію траєкторії виконання маневру на основі низки критеріїв та забезпечить безпечне розходження літальних апаратів у просторі.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, конфліктна ситуація, літальний апарат, маневр ухилення, система керування, управління повітряним рухом.

Вступ

Керування рухом пілотованих літальних апаратів (ЛА) та безпілотних літальних апаратів (БпЛА) має багато відмінностей, які напряму впливають на процес вирішення конфліктних ситуацій (КС).

Насамперед варто зазначити наявність людського фактору в контурі керування ЛА. Традиційні ЛА (літаки, гелікоптери, планери тощо) мають одного або кількох пілотів, які забезпе-

чують безпосередній контроль за станом польоту та можливість прийняття рішень у режимі реального часу. На противагу цьому БпЛА мають різні режими керування: ручний (дистанційний), напівавтоматичний та автоматичний (автономний). У разі ручного керування оператор БпЛА може перебувати за десятки або сотні кілометрів від керованого БпЛА, що призводить до затримок зв'язку й ускладнює прийняття рішень в режимі реального часу, особливо в динамічних конфліктних ситуаціях.

Цитування: Волков О.Є., Сімахін В.М. Технологія керування безпілотним літальним апаратом за умов конфліктних ситуацій. *Control Systems and Computers*, 2024, 1, 27—37. <https://doi.org/10.15407/csc.2024.01.027>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

ях. Багато сучасних БПЛА мають автоматичні або напіваавтоматичні режими польоту, що дає їм змогу виконувати певні завдання без безпосереднього втручання оператора. Напіваавтоматичний режим забезпечує навігацію за точками маршруту, уникнення перешкод, спостереження за цілями або об'єктами тощо. Автоматичний або автономний режим надає БПЛА засоби для самостійного керування польотом, які є максимально наближеними до керування оператором. У конфліктних ситуаціях керування БПЛА суттєво залежить від режиму керування. Ручний та напіваавтоматичний режими дають оператору БПЛА змогу зробити остаточний вибір підходів і маневрів для уникнення зіткнення. Автоматичний режим, своєю чергою, має бути забезпечений програмно-алгоритмічними засобами для повноцінного автономного вирішення КС.

Постановка проблеми

Детальний огляд підходів до виявлення та подолання КС наведено в [1, 2]. Огляд розвитку системи керування повітряним рухом, системи попередження та запобігання зіткнень (TCAS) і трьох різних рівнів виявлення та подолання КС наведено *J. Tang* в [1]. Аналіз і опис підходів до уникнення зіткнень для БПЛА наводиться в [2], де авторами надано інформацію про методи аналізування повітряного простору, виявлення конфліктів з достовірністю та без достовірності, а також методи подолання КС для одиночних БПЛА та для груп БПЛА.

Для виявлення та подолання потенційних конфліктів у повітрі *G. Migliaccio* зі співавторами запропонували геометричний детермінований підхід, у якому виявлення конфлікту відбувається за допомогою рухомого еліпсоїда, а чотирирівимірний підхід у просторово-часовому вимірі забезпечує розв'язання КС [3]. Запропоноване рішення також дає змогу БПЛА дотримуватися вертикальних і горизонтальних мінімумів розмежування та обмежень руху в режимі реального часу.

Проектування системи для уникнення КС для багатьох БПЛА здійснюється на основі оригінального методу тривимірної швидкості пе-

решкод та побудови бази правил уникнення зіткнень [4]. Авторами пропонується використання захищеної зони у формі циліндра та вводиться піраміда зіткнень і піраміда швидкісних перешкод, які використовуються для уникнення зіткнень між транспортним засобом і статичною перешкодою.

Ієрархічний асинхронний метод виявлення конфліктів у поєднанні з методом кооперативного вирішення конфлікту БПЛА було запропоновано в [5]. Подолання конфлікту зводиться до нелінійної оптимізаційної задачі. За умови рівних швидкостей БПЛА, нелінійне обмеження безпечного розмежування між ними перетворюється на лінійні обмеження, і задача розв'язується методом змішаного цілочисельного лінійного програмування. За умови різних швидкостей БПЛА — нелінійна оптимізаційна задача розв'язується методом стохастичного паралельного градієнтного спуску.

Розглянемо проблему конфліктних ситуацій ЛА в загальному вигляді (рис. 1). Рух двох ЛА у просторі задається векторами їхніх швидкостей \vec{V}_1 і \vec{V}_2 [6]. Мінімально допустиме зближення ЛА r_{\min} визначають за формулами:

$$r_{\min} = \bar{V}_{12} * \frac{\bar{d}_0}{V_{12}};$$

$$\bar{V}_{12} = \bar{V}_1 - \bar{V}_2,$$

де \bar{V}_{12} — вектор відносної швидкості, \bar{d}_0 — вектор відстані між ЛА.

Відстань d між ЛА в момент часу t визначають за формулами:

$$d(t) = \sqrt{(V_{\text{від}}^2 t^2 - 2d_0 V_{\text{збл}} t + d_0^2)};$$

$$V_{\text{від}} = \sqrt{(V_1^2 - 2V_1 V_2 \cos \varphi + V_2^2)};$$

$$V_{\text{збл}} = V_1 \cos \theta_1 - V_2 \cos(\theta_1 + \varphi),$$

де $V_{\text{від}}$ — відносна швидкість ЛА; $V_{\text{збл}}$ — швидкість зближення ЛА, що дорівнює складовій відносної швидкості ЛА спрямованої вздовж лінії перетину ЛА; θ_1 — пеленг другого ЛА відносно напрямку першого; φ — відносний курс; d_0 — відстань між ЛА в початковий момент часу.

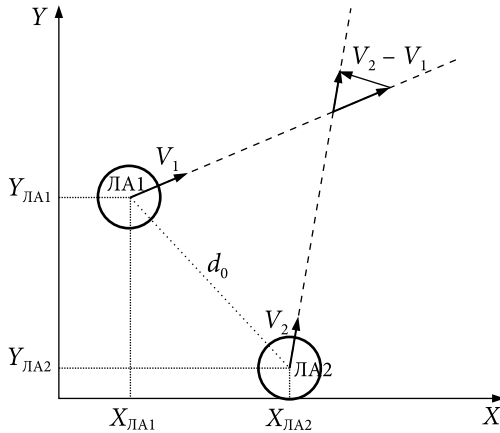


Рис. 1. Взаємодія ЛА при конфліктній ситуації

Час $t_{збл}$ до найбільшого зближення ЛА визначають за формулою:

$$t_{збл} = d_0 \frac{V_{збл}}{V_{від}^2}.$$

Відстань $d_{збл}$ між ЛА в момент їхнього найбільшого зближення:

$$d_{збл} = d_0 \frac{V_n}{\sqrt{V_{від}^2}},$$

де V_n — складова відносної швидкості $V_{від}$, що спрямована перпендикулярно до лінії d_0 , яка поєднує ЛА, та обчислюється за формулою:

$$V_n = V_2 \sin(\theta_1 + \varphi) - V_1 \sin \theta_1.$$

За наявності інформації про точні координати двох ЛА та в разі перетину їхніх траєкторій польоту відстань L_{12} між цими двома ЛА можна визначити:

$$L_{12} = \sqrt{[x_1(t) - x_2(t)]^2 + [y_1(t) - y_2(t)]^2},$$

де x і y — відомі координати в момент часу t для ЛА₁ та ЛА₂.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та розроблення технології керування безпілотним літальним апаратом за умов конфліктних ситуацій, що дає змогу оптимізувати траєкторії виконання маневру на основі низки критеріїв та забезпечить безпечне розходження ЛА у просторі.

Концепція розв'язання конфліктних ситуацій безпілотних літальних апаратів

Розглянемо концептуальні засади розв'язання КС [7, 8]. Під конфліктною ситуацією розумітимемо події, які відповідають фактичному або прогнозованому порушенню норм підтримання безпечної відстані у просторі, і за відсутності відповідних дій пілотів або системи управління повітряним рухом можуть призвести до катастрофічної ситуації — зіткнення літальних апаратів.

Нехай у початковий момент часу t_0 в деякій зоні польотів обмеженого розміру Q міститься множина A , що складається з ЛА в кількості i та керований (власний) БПЛА A_{cont} :

$$A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_i\} \cup A_{cont}.$$

Кожен ЛА має власний план польоту та виконує його відповідно до вказівок оператора, пілота або автономно. Традиційні пілотовані ЛА (літаки, гелікоптери, планери тощо) обладнано системами зв'язку, навігації та спостереження і складають множину A_p . Множину безпілотних ЛА A_{um} розділимо на підмножини дистанційно керованих БПЛА A_r , автономних БПЛА A_a . Відповідно множину A можна подати у формі:

$$A = A_p \cup A_{um} \cup A_{cont} = A_p \cup A_r \cup A_a \cup A_{cont}.$$

Більшість сучасних БПЛА мають обмежені системи зв'язку, що впливає на виявлення та розпізнавання БПЛА як об'єктів у повітряному просторі. Класифікація, переваги та недоліки технологій взаємодії між БПЛА та способів комунікації між ними наведено в [9—11]. Зокрема, одним із перспективних напрямків розвитку комунікації між БПЛА є використання сучасних стільникових мереж (4G/5G/6G) [12], які мають високу швидкість і низьку затримку передачі даних. Технологію інтелектуального моніторингу БПЛА на основі використання базових станцій стільникового зв'язку для первинної обробки даних та метод мережецентричного моніторингу кіберінцидентів у стільни-

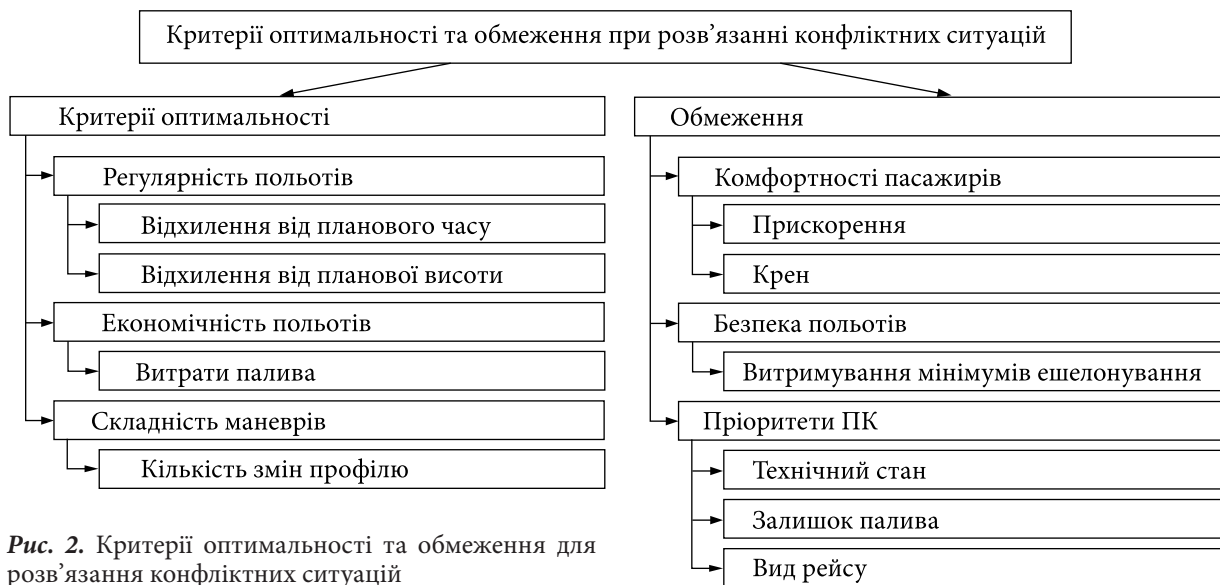


Рис. 2. Критерії оптимальності та обмеження для розв'язання конфліктних ситуацій

кових мережах для зв'язку БпЛА запропоновано в [13, 14].

Враховуючи зазначені обмеження систем комунікації БпЛА та перспективи до подолання таких обмежень, вважаємо, що для БпЛА способи виявлення інших ЛА поділяються на два типи: односторонній і кооперативний. До одностороннього способу належать такі типи як візуальне, радіолокаційне, звукове тощо. До кооперативного способу належать такі, що дають змогу двом БпЛА спілкуватися між собою шляхом обміну інформацією та повідомленнями. Тоді множину БпЛА A_{um} можна представити у вигляді:

$$A_{um} = \{A_{um_o}\} \cup \{A_{um_c}\} \cup \{A_{um_{oc}}\} \cup A_{cont},$$

де A_{um_o} — множина БпЛА, які використовують тільки односторонній спосіб виявлення, A_{um_c} — множина БпЛА, які використовують тільки кооперативний спосіб виявлення, $A_{um_{oc}}$ — множина БпЛА, які використовують односторонній та кооперативний способи виявлення.

Для традиційних пілотованих ЛА на основі вимог Європейської організації з безпеки аеронавігації "Eurocontrol" щодо прийняття рішення та розрахунку безпечного маневру необхідною є 20-хвилинна ділянка прогнозування траєкторії польоту на наявність КС. Вважа-

тимемо, що зона Q для традиційних ЛА має бути радіусом 50 кілометрів. Суворих вимог для прогнозування траєкторії БпЛА не встановлено. З урахуванням тактико-технічних характеристик середньостатистичного БпЛА, вважаємо, що зона Q для БпЛА становить 5 кілометрів.

Нехай у початковий момент часу t_0 розташування всіх ЛА з множини A визначається випадково, але так, щоб на деякому проміжку часу (t_p, t_b) між ними не виникало КС, де t_b — деякий початковий проміжний момент часу. Також припустимо, що кількість ЛА в множині A є сталою на весь час виконання польоту в зоні Q . Тоді нехай існує деяка кількість (≥ 3) виявлених конфліктних пар ЛА A_i і A_j , для яких не виконується умова забезпечення безпечної відстані у просторі та виникає потенційна загроза їхнього зіткнення:

$$L(A_i, A_j, t) \geq L_{safe}, t \in (t_p, t_g),$$

де $L(A_i, A_j, t)$ — відстань між ЛА A_i і A_j в момент часу t ; L_{safe} — норма безпечного розходження ЛА; t_g — деякий граничний момент часу, на який прогнозується траєкторія ЛА.

З урахуванням особливостей систем керування БпЛА та обмежень систем їхньої комунікації, задача розв'язання КС для керованого

(власного) БпЛА полягає у визначенні такої траєкторії, яка б забезпечувала відсутність її перетинів із траєкторіями польоту інших ЛА з множини A . Розв'язання КС може базуватися на різних критеріях оптимальності та обмежень (рис. 2) [15]. Оптимальність розв'язання КС можна визначити як мінімізацію витрат під час маневрування щодо запобігання потенційного конфлікту за заданих обмежень.

Для забезпечення визначення просторових і часових втрат, необхідних на виконання маневру, та забезпечення оптимальності подолання КС використовуємо глобальний оптимум за мінімальним відхиленням ЛА від початкових траєкторій. У його ролі виступає інтегральний показник, який характеризує відхилення конфліктних ЛА від початкових планів польоту. Вважається, що інтегральний показник характеризує відхилення траєкторії, як площу різниці між запланованою та результуючою траєкторією:

$$S_m = \int_{x_0}^{x_k} |y_0(x) - y_k(x)| dx,$$

де $y_0(x)$, $y_k(x)$ — початкова і змінена лінія траєкторії ЛА на площині; x_0 , x_k — координати точки початку і кінця маневру для подолання КС.

Для забезпечення оптимального розв'язання КС ЛА доцільно також ввести поняття зони невизначеності ЛА та ступінь керованості ЛА.

Зона невизначеності ЛА (рис. 3) визначає найменші допустимі відстані для зближення протягом польоту та є початковими даними для визначення наявності конфліктної ситуації.

Зона невизначеності ЛА Q_{un} являє собою функцію наступного вигляду:

$$R_{un} = f(P_{loc}, \hat{Y}),$$

де R_{un} — радіус зони невизначеності ЛА; P_{loc} — похибка при визначенні місцеположення ЛА; \hat{Y} — динамічні характеристики ЛА.

Ступінь керованості надає змогу визначити потенційні можливості ЛА, які перебувають у конфліктній ситуації стосовно одне одного, щодо виконання маневрів ухилення. Ступінь керованості DoH прийнято визначати на основі математичної моделі системи (наприклад, по-

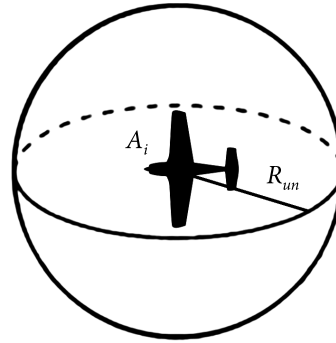


Рис. 3. Зона невизначеності літального апарату

вітряного корабля, судна тощо) та рівняннями абсолютної нелінійної інтегральної інваріантності [16]. Зокрема, ступенем керованості DoH системи по координаті x називають ступінь $DoH_x \leq Q_x$, такий що будь-які дві точки x_1 та x_2 якого взаємно з'єднуються за допомогою відповідного обмеженого керування $u = u(t_0, x_0, x, v) \in U$, де x — n -мірний вектор стану системи, $n \geq 3$, Q_x — множина станів вектора x , u — m -мірний вектор стану керувальних впливів, v — l -мірний вектор збурень, що діють на систему.

Отже, на сьогодні забезпечення безпеки та подолання конфліктних ситуацій ЛА є офіційно стандартизованим здебільшого для традиційних пілотованих ЛА, а задача розв'язання КС для БпЛА у спільному повітряному просторі з іншими типами ЛА не має загальноприйнятих правил та підходів для вирішення. Під час польоту БпЛА ситуації, що містять фактичне або прогнозоване порушення норм підтримання безпечної відстані у просторі, потребують використання комплексного підходу до оцінювання та забезпечення оптимальності подолання таких порушень. На основі наведеної концепції конфліктних ситуацій БпЛА пропонується розроблення технології, яка здатна забезпечувати безпечну відстань при розходженні ЛА у просторі із мінімізацією витрат з урахуванням наявних обмежень.

Технологія керування безпілотним літальним апаратом в умовах конфліктних ситуацій

Для забезпечення оптимальності подолання КС для керованого БпЛА A_{cont} шляхом мінімі-

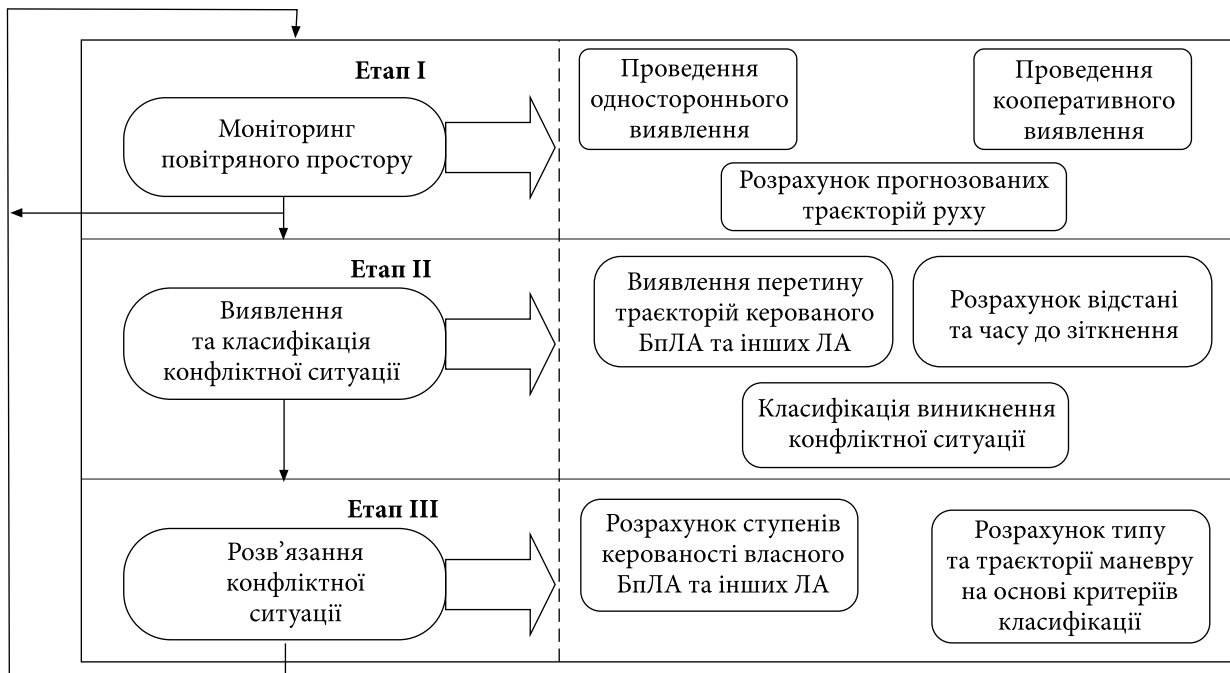


Рис. 4. Структура технології керування БПЛА в умовах КС

зації відхилення від початкової траєкторії пропонується технологія керування в умовах конфліктних ситуацій (рис. 4). Технологія базується на критеріях виникнення КС і класифікації критеріїв маневру ухилення. Залежно від відстані між ЛА, їхніх швидкостей, траєкторії тощо, КС може потребувати і негайного прийняття рішень щодо керування для уникнення зіткнення, і завчасної та поступової зміни траєкторії.

У загальному випадку процедуру керування БПЛА A_{cont} в умовах конфліктних ситуацій можна поділити на три основні етапи: моніторинг повітряного простору, виявлення та класифікація КС, розв'язання КС. Етапи пов'язані між собою, а дії кожного з них циклічно виконуються для забезпечення безпеки польоту. Наведемо опис послідовності дій для кожного етапу технології.

I етап. Моніторинг повітряного простору. Цей етап включає низку процедур, які спрямовано на виявлення інших ЛА в деякій заданій зоні та розрахунок траєкторій їхнього польоту. Послідовність дій цього етапу можна описати так.

1. Задається обмежена сферична зона простору Q радіусом 5 кілометрів $R_Q = 5$. Ця уявна зона визначає область, у якій відбувається активне виявлення інших ЛА та потенційних загроз перетину траєкторій їхнього польоту.

2. Вважаємо, що всі ЛА, які потенційно перебувають у зоні Q та загальна кількість яких дорівнює n , мають свій план польоту й для кожного з них задається умовна зона невизначеності $Q_{un i}$.

$$A_i := Q_{un i} \in A_i \in Q, i \in 1, n.$$

3. За допомогою сенсорів та/або засобів комунікації керований БПЛА A_{cont} під час руху в зоні Q здійснює постійний моніторинг для виявлення інших ЛА, які також перебувають у цій зоні:

```
while (true):A_cont.execute.monitoring( );
if(A_cont.containsComms.equals.True):A_cont.useComms( );
else: A_cont.useSensors( );
```

4. На основі даних, які постійно надають сенсори/засоби комунікації під час моніторингу, визначається наявність інших ЛА у зоні Q та розраховуються прогнозовані траєкторії

руху T_{A_i} таких ЛА. Наявність точок перетину траєкторій у кожний момент часу t_i свідчить про можливу загрозу зіткнення власного БПЛА A_{cont} з іншими A_i .

$$T_{A_i} = f(V, \gamma, \theta, \psi).$$

Наявність точок перетину траєкторії руху керованого БПЛА та траєкторій інших ЛА визначає наявність КС та є фактором для переходу до другого етапу. Своєю чергою послідовність дій першого етапу продовжує своє виконання циклічно для виявлення потенційних нових КС.

II етап. Виявлення та класифікація КС. Цей етап включає здійснення розрахунків для визначення часу та відстані до зіткнення у визначеній КС та класифікацію виникнення КС, яка виконується на основі критеріїв за значеннями відстані, часу, швидкості тощо. Процедуру виконання другого етапу можна описати наступною послідовністю дій.

5. У разі загрози зіткнення керованого БПЛА з іншими ЛА визначають відстань L_{cr} та час t_{cr} до зіткнення.

$$L_{cr} = f(A_{cont\ pos}, A_{i\ pos}, Q_{un\ i}, Q_{un\ cont}, S_i),$$

$$t_{cr} = f(L_{cr}, V_{cont}, V_i, v),$$

де V — швидкість ЛА; γ — кут крену; ψ — кут рискання; θ — кут тангажа, $A_{cont\ pos}$ — розташування керованого БПЛА; $A_{i\ pos}$ — розташування ЛА A_i ; S_i — розміри ЛА A_i ; $Q_{un\ i}$ — зона невизначеності керованого БПЛА; $Q_{un\ cont}$ — швидкість керованого БПЛА; V_i — швидкість ЛА A_i ; v — вектор зовнішніх збурень.

6. На основі прогнозованої траєкторії руху, відстані та часу до зіткнення визначається класифікація виникнення КС.

$$CS_{type} \in \{critical, urgent, threatening, distant\}$$

$$CS_{type} = f(T_{A_i}, L_{cr}, t_{cr}),$$

де CS_{type} — тип КС; *critical* — КС з максимальною загрозою, що потребує негайного прийняття рішення; *urgent* — КС з високою загрозою, що потребує швидкого прийняття рішення;

threatening — КС з посередньою загрозою, що не потребує швидкого прийняття рішення

distant — КС з низькою загрозою, що не потребує швидкого прийняття рішення.

III етап. Розв'язання КС. Цей етап включає в себе послідовність дій для визначення ефективного маневру ухилення для розв'язання КС. Особливість керування БПЛА в КС за умови відсутності глобальної системи управління повітряним рухом вимагає маневрування виключно власним БПЛА A_{cont} та потребує оптимального балансу між використанням запасів власних ресурсів і критерію глобального оптимуму (мінімального відхилення від початкової траєкторії руху). Послідовність дій третього етапу технології описується у такий спосіб.

7. Для керованого БПЛА A_{cont} розраховується точна ступінь керованості DoH_{cont} на основі інформації від бортових систем щодо власних поточних аеродинамічних характеристик, розташування, плану польоту тощо. Для кожного іншого ЛА розраховуються орієнтовні ступені керованості DoH_i , які засновані на врахуванні аеродинамічних характеристик, розташування тощо, які можливо визначити на основі доступних даних.

$$DoH_{cont} = \Sigma DoH_{cont}(V),$$

$$DoH_{cont}(\gamma), DoH_{cont}(\theta), DoH_{cont}(\psi),$$

$$DoH_i \cong \Sigma DoH_i(V), DoH_i(\gamma), DoH_i(\theta), DoH_i(\psi),$$

де $DoH_{cont}(V)$ — ступінь керованості швидкості власного БПЛА; $DoH_{cont}(\gamma)$ — ступінь керованості креном власного БПЛА; $DoH_{cont}(\theta)$ — ступінь керованості тангажем власного БПЛА; $DoH_{cont}(\psi)$ — ступінь керованості рисканням власного БПЛА; $DoH_i(V)$, $DoH_i(\gamma)$, $DoH_i(\theta)$, $DoH_i(\psi)$ — ступені керованості швидкості, крену, тангажу та рискання ЛА A_i відповідно.

Також необхідно визначити наявний ступінь керованості власного БПЛА A_{cont} у поточний момент часу:

$$\Delta DoH_{cont} = DoH_{cont} - = DoH_{cont}^t$$

де ΔDoH_{cont} — наявний ступінь керованості власного БПЛА; DoH_{cont}^t — використаний ступінь

пінь керованості власного БПЛА станом на момент часу t .

При цьому:

$$\begin{aligned} \Delta DoH_{cont}(V) &= DoH_{cont}(V) - DoH_{cont}(V)^t, \\ \Delta DoH_{cont}(\gamma) &= DoH_{cont}(\gamma) - DoH_{cont}(\gamma)^t, \\ \Delta DoH_{cont}(\theta) &= DoH_{cont}(\theta) - DoH_{cont}(\theta)^t, \\ \Delta DoH_{cont}(\psi) &= DoH_{cont}(\theta) - DoH_{cont}(\psi)^t, \end{aligned}$$

де $\Delta DoH_{cont}(V)$, $\Delta DoH_{cont}(\gamma)$, $\Delta DoH_{cont}(\theta)$, $\Delta DoH_{cont}(\psi)$ — наявні ступені керованості БПЛА за швидкістю, креном, тангажем та рисканням керованого БПЛА відповідно;

$DoH_{cont}(V)^t$, $DoH_{cont}(\gamma)^t$, $DoH_{cont}(\theta)^t$, $DoH_{cont}(\psi)^t$ — використані ступені керованості за швидкістю, креном, тангажем та рисканням керованого БПЛА станом на момент часу t відповідно.

8. На основі визначених типу КС CS_{type} , наявного ступеня керованості DoH_{cont} , з урахуванням орієнтовних ступенів керованості DoH_i та відповідно до бази критеріїв класифікації маневру ухилення розраховується тип і траєкторія маневру ухилення. Також при визначенні типу маневру та розрахунку траєкторії маневру ухилення необхідним є врахування глобального оптимуму за критерієм мінімального відхилення керованого БПЛА від початкової траєкторії руху. Зміна висоти руху ΔH , зміна ΔV , зміна курсу $\Delta \psi$ або комбінація цих маневрів визначається за показником ступеня керованості власного БПЛА A_{cont} .

$$T_{ev} = f(CS_{type}, DoH_{cont}, DoH_i, S_m, EV_{type}),$$

$$T_{ev} = f(\Delta H, \Delta V, \Delta \psi),$$

$$EV_{type} = \left\{ \begin{array}{l} \text{База правил щодо розходження} \\ \text{літальних апаратів у просторі} \end{array} \right\},$$

де EV_{type} — визначений за критеріями тип маневру ухилення, що обирається із бази правил розходження ЛА у просторі.

Під час виконання маневру ухилення керований БПЛА A_{cont} виконує постійний моніторинг інших ЛА A_j для забезпечення безпеки

під час виконання маневру ухилення для поточної КС з ЛА A_j . Після завершення маневру ухилення та повернення на початкову траєкторію руху, керований БПЛА A_{cont} циклічно виконує моніторинг повітряного простору для забезпечення подальшої безпеки польоту.

Запропонована технологія керування БПЛА за умов КС дає змогу оптимізувати процес моніторингу повітряного простору, виявлення та класифікації конфліктних ситуацій та надає способи для їх розв'язання. Забезпечення найменших просторових та часових втрат під час польоту відбувається за допомогою критеріїв виникнення КС та класифікації маневру ухилення для розв'язання КС, який враховує критерій мінімальності площі необхідного маневру.

Висновки

За результатами аналізу сучасного стану проблеми керування безпілотними літальними апаратами за умов конфліктних ситуацій визначено, що такі задачі на сьогодні вже вирішуються, проте доцільним є проаналізувати можливість подальшого забезпечення додаткового захисту керованого БПЛА та оптимізації його траєкторії для забезпечення найменших просторових і часових втрат під час польоту. Конфліктні ситуації є порушенням норм підтримання безпечної відстані у просторі та призводять до зіткнення ЛА за відсутності відповідних дій щодо подолання таких порушень.

Для розроблення технології керування безпілотними літальними апаратами за умов конфліктних ситуацій визначено низку підходів до розв'язання конфліктних ситуацій між літальними апаратами різних типів; наведено концепцію поняття конфліктних ситуацій для БПЛА. На цій основі було розроблено технологію керування, яка об'єднує різні підходи до виявлення КС, класифікацію виникнення КС, класифікацію маневру ухилення та забезпечує безпечно розходження керованого БПЛА з різними типами ЛА у просторі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tang J. Review: Analysis and Improvement of Traffic Alert and Collision Avoidance System, IEEE Access, vol. 5. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 21419—21429, 2017. doi: 10.1109/access.2017.2757598.
2. Tang J., Lao S., Wan Y. Systematic Review of Collision-Avoidance Approaches for Unmanned Aerial Vehicle. IEEE Systems Journal, vol. 16, no. 3. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2022. pp. 4356—4367, doi: 10.1109/jsyst.2021.3101283.
3. Migliaccio G., Mengali G., Galatolo R. Conflict detection and resolution algorithms for UAVs collision avoidance, The Aeronautical Journal, vol. 118, no. 1205. Cambridge University Press (CUP), 2014. pp. 828—842. doi: 10.1017/s0001924000009568.
4. Tan C.Y., Huang S., Tan K.K., Teo R.S.H., Liu W.Q., Lin F. Collision Avoidance Design on Unmanned Aerial Vehicle in 3D Space, Unmanned Systems, vol. 06, no. 04. 2018. World Scientific Pub Co Pte Lt, pp. 277—295. doi: 10.1142/s2301385018500115.
5. Yang J., Yin D., Niu Y., Zhu L. Unmanned aerial vehicles conflict detection and resolution in city airspace, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, 2015, pp. 2436—2441, doi: 10.1109/ROBIO.2015.7419704.
6. Харченко В.П., Аргунов Г.Ф. Конфликтные ситуации в управлении воздушным движением: навчальний посібник. Київ: НАУ, 2010. 171 с.
7. Волков О.Є. Подход к решению проблемы предупреждения столкновений воздушных кораблей в условиях полётов по произвольным маршрутам: тези. Проблеми інформатики і моделювання: XVI Міжнародна конференція, 12—16 вересня 2016 р. м. Одеса, 2016. С. 16.
8. Волков О.Є., Павлова С.В. Конфліктна взаємодія повітряних кораблів при попередженні загроз зіткнення. Управляющие системы и машины, 2017. № 4. С. 83—91.
9. Seidaliyeva U., Ilipbayeva L., Taissariyeva K., Smailov N., Matson E.T. Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review, Sensors, vol. 24, no. 1. 2023. MDPI AG, p. 125. doi: 10.3390/s24010125.
10. Koulouris C. et al. A Survey Study and Comparison of Drones Communication Systems, Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer Nature Singapore, 2023. pp. 351—361, doi: 10.1007/978-981-99-4795-9_33.
11. Drone Communication Market Share, Research, Size, Analysis. Allied Market Research. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/drone-communication-market-A183069> (дата звернення: 29.03.2024).
12. Drone Communication Technologies: Navigating the Future of Unmanned Flight. GadgetMates. URL: <https://gadgetmates.com/drone-communication-technologies> (дата звернення: 29.03.2024.)
13. Odarchenko R., Volkov O., Simakhin V., Gospodarchuk O. Technology of Intellectual Control of Unmanned Aerial Vehicles Monitoring in the Airspace Using 5G Cellular Networks. Cybernetics and Computer Engineering. 2020. no. 4 (202). pp. 44—56. doi: 10.15407/kvt202.04.044.
14. Odarchenko R., Usik P., Volkov O., Simakhin V., Gospodarchuk O., Burmak Y. 5G Networks Cyberincidents Monitoring System for Drone Communication. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). Kiev, Ukraine. 2019. pp. 165—169. doi: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943890.
15. Васильев Д.В. Модель багатокритеріального вибору траєкторій маневрування при розв’язанні конфліктних ситуацій між літаками. Системи обробки інформації. 2013. Вип. 4 (111). С. 85—88.
16. Волков О.Є. Технологія вирішення конфліктних ситуацій повітряних кораблів на базі інваріантної мережецентричної системи: тези. Інформаційні технології в освіті, науці й техніці: III Міжнародна науково-практична конференція, 12—14 травня 2016 р. м. Черкаси. 2016. С. 55—56.

Надійшла 20.03.2024

REFERENCES

1. Tang, J (2017). “Review: Analysis and Improvement of Traffic Alert and Collision Avoidance System,” IEEE Access, vol. 5. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 21419—21429. doi: 10.1109/access.2017.2757598.
2. Tang, J., Lao, S., Wan Y. (2022). “Systematic Review of Collision-Avoidance Approaches for Unmanned Aerial Vehicles,” IEEE Systems Journal, 16 (3). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 4356—4367. doi: 10.1109/jsyst.2021.3101283.

3. Migliaccio, G., Mengali, G., Galatolo, R. (2014). "Conflict detection and resolution algorithms for UAVs collision avoidance," *The Aeronautical Journal*, vol. 118, no. 1205. Cambridge University Press (CUP), pp. 828—842. doi: 10.1017/s0001924000009568.
4. Tan, C.Y., Huang, S., Tan, K.K., Teo, R.S.H., Liu, W.Q., Lin, F. (2018). "Collision Avoidance Design on Unmanned Aerial Vehicle in 3D Space," *Unmanned Systems*, 6 (4). World Scientific Pub Co Pte Lt, pp. 277—295. doi: 10.1142/s2301385018500115.
5. Yang, J., Yin, D., Niu, Y., Zhu, L. (2015). "Unmanned aerial vehicles conflict detection and resolution in city airspace," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, China, pp. 2436-2441, doi: 10.1109/ROBIO.2015.7419704.
6. Kharchenko, V.P., Argunov, G.F. (2010). *Conflict situations in air traffic control: textbook*. Kiev: NAU, 171 p. (In Russian).
7. Volkov, O.Ye. (2016). "Approach to solving the problem of collision prevention of air ships in the conditions of flights along arbitrary routes: abstracts". *Problems of informatics and modeling: XVIII International Conference*, 12—16 September 2016. Odessa, 2016. p. 16. (In Russian).
8. Volkov, O.Ye., Pavlova, S.V. (2017). "The Conflict Interaction of Airships in Collision Prevention Threats," *Upr. sist. maš.*, 2018, Issue 4 (270), pp. 83—91. DOI: <https://doi.org/10.15407/usim.2017.04.083> (In Ukrainian).
9. Seidaliyeva, U., Ilibayeva, L., Taissariyeva, K., Smailov, N., Matson, E.T. (2023). "Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review," *Sensors*, vol. 24, no. 1. MDPI AG, p. 125. doi: 10.3390/s24010125.
10. Koulouris, C. et al. (2023). "A Survey Study and Comparison of Drones Communication Systems," *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Nature Singapore, pp. 351—361. doi: 10.1007/978-981-99-4795-9_33.
11. Drone Communication Market Share, Research, Size, Analysis. Allied Market Research. [online]. Available at: <<https://www.alliedmarketresearch.com/drone-communication-market-A183069>> [Accessed: 29.03.2024].
12. Drone Communication Technologies: Navigating the Future of Unmanned Flight. GadgetMates. [online]. Available at: <<https://gadgetmates.com/drone-communication-technologies>> [Accessed: 29.03.2024].
13. Odarchenko, R., Volkov, O., Simakhin, V., Gospodarchuk, O. (2020). "Technology of Intellectual Control of Unmanned Aerial Vehicles Monitoring in the Airspace Using 5G Cellular Networks," *Cybernetics and Computer Engineering*, no. 4 (202). pp. 44—56. doi: 10.15407/kvt202.04.044.
14. Odarchenko, R., Usik, P., Volko, O., Simakhin, V., Gospodarchuk, O., Burmak, Y. (2019). "5G Networks Cyberincidents Monitoring System for Drone Communications," 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kiev, Ukraine, pp. 165—169, doi: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943890.
15. Vasil'ev, D.V. Model of multi-criteria selection of maneuvering trajectories in resolving conflict situations between aircraft. *Information Processing Systems*, 2013, 4 (111), pp. 85—88 (In Ukrainian).
16. Volkov, O.Ye. (2016). "Technology for resolving conflict situations of aircraft based on an invariant network-centered system: theses". *Information technologies in education, science and technology: III International Scientific and Practical Conference*, May 12—14, 2016. Cherkasy. 2016. pp. 55—56 (In Ukrainian).

Received 20.03.2024

O.Ye. Volkov, PhD (Eng.), Senior Researcher, Director, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5418-6723>,
40, Akad. Glushkov Avenue, Kyiv 03187, Ukraine,
alexvolk@ukr.net

V.M. Simakhin, PhD Student, Senior Researcher of the Research Laboratory of Unmanned Complexes and Systems, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of the NAS and MES of Ukraine.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4497-0925>,
40, Akad. Glushkov Avenue, Kyiv 03187, Ukraine,
thevladsima@gmail.com

TECHNOLOGY OF UNMANNED AERIAL VEHICLE CONTROL IN CONFLICT SITUATIONS

Introduction. The motion control of traditional manned aircraft and unmanned aerial vehicles (UAVs) has many distinctions that directly affect the process of conflict resolution. The problem of resolving conflict situations in-

volving different types of aircraft is relevant due to the rapid development of unmanned aircraft and the expansion of its application areas.

Purpose. The aim of the paper is to develop a technology for controlling an unmanned aerial vehicle in conflict situations, which will allow optimizing the maneuver trajectory based on a number of criteria and ensure safe separation of aircraft in airspace.

Results. The paper proposes a technology for UAV control in the conditions of a conflict: a number of approaches to resolving conflict situations between different types of aircraft are identified; the concept of conflict situations for UAVs and traditional manned aircrafts is presented, on the basis of which a technology is developed that combines different approaches to detecting a conflict, classifying the occurrence of a conflict, classifying an evasive maneuver, and ensuring the safe separation of the controlled UAV from different types of aircraft in airspace.

Conclusions. Based on the analysis results of the current state of UAV control in the conditions of a conflict problem, it is determined that such tasks are already being solved, but it is advisable to analyze the possibility of further providing additional protection for the controlled UAV and optimizing its trajectory to ensure the least spatial and time losses during the flight. Conflict situations are a violation of the norms of maintaining a safe distance in space and lead to a collision of aircraft in the absence of appropriate actions to resolve such violations. Therefore, for the effective resolution of the conflict situations, the classifications of the degree of threat, classification of evasive maneuvers and ensuring minimal spatial and time losses by using the criterion of minimum area of the required maneuver are proposed.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, conflict situation, aircraft, evasive maneuver, control system, airspace management.*