Літальні апарати: аеродинаміка, силові установки, обладнання, озброєння та застосування

УДК 519.81

DOI: 10.30748/zhups.2020.65.05

М.В. Дудко¹, Ю.І. Полонський¹, Н.О. Королюк¹, О.А. Коршець²

¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

²Національний університет оборони України ім. І. Черняхівського, Київ

МЕТОД ФОРМАЛІЗАЦІЇ ЗНАНЬ ПРО ПРОЦЕС ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ТИПУ 2

У статті пропонується підхід щодо формалізації знань про процес планування маршруту польоту безпілотного літального апарату на етапі планування повітряної розвідки за допомогою евристичних методів, які є найкращими з точки зору врахування практики, досвіду, інтуїції, знань осіб, що приймають рішення, при веденні повітряної розвідки. Розроблений метод дозволяє формалізувати фактори, що враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища на дальність польоту безпілотного літального апарату у вигляді лінгвістичних і інтервально-оцінюваних параметрів для кожного варіанту, які дозволяють врахувати невизначеність.

Ключові слова: планування маршруту польоту, інтервальні нечіткі множини типу 2, особа, що приймає рішення, нечітка логічна система, трикутні нечіткі числа, трапецієподібні нечіткі інтервали, знання, формалізація знань.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні загрози українській державності з боку РФ вимагають пошуку адекватної відповіді на щоденні виклики. Це видається неможливим без теоретико-методологічного осмислення сутності сучасних збройних зіткнень, аналізу, вивченню та узагальненню світового досвіду протистояння воєнній загрозі [1–3]. Збройні Сили повинні бути готові відбити агресію шляхом ведення оборонних дій. Найважливішою задачею командування при веденні оборони держави стає постійне спостереження за противником, яке повинно забезпечити своєчасне і організоване стратегічне розгортання. Основна роль при цьому відводиться розвідці. Повітряна розвідка є однією з найважливіших умов успіху бойових дій авіації та інших родів військ, завданням якої є своєчасне забезпечення командування і штабів повними і достовірними даними про противника.

Знати замисел противника, розташування його засобів ураження та угруповання, відповідно реагувати – значить досягти успіху в бою. Особа, що приймає рішення, не здатна прийняти правильне рішення або ефективно застосувати вогневі засоби, якщо вона не організує безперервну активну і цілеспрямовану розвідку, не отримує достовірні

відомості про противника. Тому саме в теперішній час безпілотні літальні апарати (БПЛА) розглядаються як ефективний засіб повітряної розвідки. Завдяки оперативному отриманню повної, достовірної інформації про противника досягається успішність ведення бойових дій.

Критерії ефективності планування маршруту польоту розвідувального БПЛА тактичної ланки обумовлюються [3–10]: завданням вищого штабу; можливостями противника щодо зриву розвідувального завдання; часовими параметрами планування та (або) виконання місії; параметрами, які визначають технічні можливості БПЛА. Застосування БПЛА в умовах вимог та обмежень, льотно-технічних можливостей БПЛА, наявності засобів ураження противника передбачає значну кількість варіантів маршруту польоту, що обумовлює складність у прийнятті обґрунтованого рішення щодо побудови оптимального маршруту польоту БПЛА. Як доводить досвід практичного застосування БПЛА [1; 4], умови, вимоги, обмеження, що висувуються до розвідувальних завдань, вплив зовнішніх факторів, врахування найважливіших об'єктів для об'єкту можуть суперечити один одному, створюючи невизначеність при наданні пріоритету будь-якому з них під час планування.

Тому виробка рекомендацій щодо планування маршрутів польоту розвідувальних БПЛА на етапі планування повітряної розвідки є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення ефективності повітряної розвідки з БПЛА тактичної ланки є достатньо поширеною науковою проблематикою, яку розглядає ряд вітчизняних та зарубіжних науковців. В [1–3] не враховано факторів впливу зовнішнього середовища, які, у свою чергу, вносять зміни у вихідний результат планування. Наведені фактори впливу враховуються із високим ступенем суб'єктивізму особи, яка планує маршрут польоту. У працях [2–5] розглядаються математичні моделі, які мають за мету підвищення ефективності розвідки з БПЛА шляхом визначення оптимального маршруту польоту за допомогою розрахунку ймовірності виконання завдань розвідки.

Проте досвід застосування БПЛА в операції Об'єднаних сил на сході України свідчить про необхідність врахування факторів, які впливають на ефективність розвідувальних операцій з БПЛА. Необхідно брати до уваги загрози та обмеження природного та технічного характеру [6–9], які суттєво впливають на кінцевий результат польотно-го завдання.

Висока вразливість БПЛА від різних факторів бойової обстановки, низька “інтелектуальність” в автономному режимі через відсутність таких людських якостей, як оперативне прийняття рішення, можливість перенесення основних зусиль на нові, більш важливі об'єкти, вміння ухилятися від небезпеки і оперативно застосовувати заходи введення противника в оману, є сьогодні нерозв'язними проблемами, що знижують ефективність бойового застосування БПЛА та потребують врахування вищеперерахованих факторів на етапі планування повітряної розвідки [11–15].

Відомі методи планування маршруту польоту БПЛА можна розділити на дві категорії: детерміновані і евристичні. Детерміновані методи засновані на точних математичних моделях, строго певній послідовності обчислень. Евристичні методи шукають рішення усередині деякого підпростору можливих прийнятних рішень, при чому знайдене ними рішення формально може не бути оптимальним (глобальним екстремумом), воно є найкращим з точки зору повсякденної практики щодо вирішення завдань повітряної розвідки, обґрунтованому на досвіді, інтуїції, знаннях особи, що приймає рішення (ОПР).

В рамках досліджуваної предметної області, як правило, фактори, що впливають на планування маршруту, мають нечіткі (розмиті) границі, а для деяких елементів інтервалу не можна з повною

впевненістю стверджувати належність цих елементів однозначно до інтервалу.

У той же час, деякі параметри району особливої уваги, ширини смуги розвідки, зовнішні фактори традиційно задаються у вигляді лінгвістичних, а не числових значень [17–18]. Представлені подібним чином дані формалізуються, як правило, з використанням математичного апарату нечітких множин [15–20].

Отже, як показав аналіз публікацій за темою дослідження, описана вище задача, має важливість для науки і практики, залишається актуальною та потребує свого вирішення.

Мета статті. Розробка методу формалізації знань про процес планування польоту БПЛА на основі інтервальних нечітких множин типу 2 (ІНМТ2) на етапі підготовки до ведення повітряної розвідки в умовах невизначеності з урахуванням факторів, що характеризують тактичні умови проведення розвідувального завдання.

Виклад основного матеріалу

З математичної точки зору задача формалізації знань про процес планування маршруту польоту БПЛА в ході підготовки до ведення повітряної розвідки можна представити як формалізоване представлення окремих прогнозованих факторів, що враховують тактичні умови проведення розвідки (границі ділянки фронту для проведення розвідки, розміри глибини оперативної побудови, ширину смуги розвідки, кількість засобів ППО), і вплив зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА (висота польоту, швидкість попутного, зустрічного вітру, швидкість БПЛА, температура повітря). В цих умовах прийнятним підходом є використання методів експертного оцінювання [20]. Значення окремих прогнозованих факторів знаходяться в деяких межах [13–19].

Це пов'язано з тим, що можна вказати діапазон (інтервал) можливих значень даних, але не можна точно визначити (спрогнозувати) їх конкретні значення. Заміна інтервальних величин середніми значеннями істотно знижує вірогідність результатів прогнозування, оскільки підвищення деталізації припущень про оперативну побудову противника, без достатніх на те підстав, збільшує ймовірність того, що результат прогнозування буде відрізнятися від дійсної обстановки в ході ведення повітряної розвідки.

Виходячи з математичної постановки задачі доцільно використовувати для представлення знань ІНМТ2, які забезпечують формалізацію більшої кількості додаткових ступенів невизначеності, в порівнянні з нечіткими множинами типу 1 (НМТ1), мають меншу обчислювальну складність, в порівнянні з загальними НМТ2.

Для ІНМТ2 значення функції приналежності другого порядку незмінні, функція приналежності уніфікована (однорідна), на відміну від загальних ІНМТ2 (рис. 1).

Пропонується формалізація знань про процес планування маршруту польоту використання трику-

тних нечітких чисел і трапецієподібних нечітких інтервалів, доцільність використання яких обумовлюється, по-перше, простотою виконання операцій над ними, по-друге, можливістю їх наочної графічної інтерпретації.

Рис. 1. Види функцій приналежності другого порядку
Джерело: розроблено авторами.

У загальному випадку нечітким інтервалом ІНМТ2 будемо називати ІНМТ2 $\tilde{A}_\Pi$ з випуклими верхньою і нижньою функціями приналежності, що обмежують площу невизначеності даного ІНМТ2, а нечітким числом ІНМТ2 будемо називати ІНМТ2 $\tilde{A}_\Delta$ з випуклими і унімодальними верхньою і нижньою функціями приналежності, що обмежують площу невизначеності даного ІНМТ2.

Особливістю представлення трикутного нечіткого числа (ТНЧ) або трапецієподібного нечіткого інтервалу (ТНІ) в термінах ІНМТ2 є те, що по-перше, ліві і праві межі нечітких величин в термінах ІНМТ2 являють собою не точки, а інтервали невизначеності; по-друге, крайні значення інтервалів невизначеності є границями двох ІНМТ1, визначених верхньою функцією приналежності $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$ і нижньою функцією приналежності $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$, які обмежують займану площу невизначеності FOU ТНЧ ІНМТ2 або ТНІ ІНМТ2 зверху і знизу відповідно; по-третє, верхня $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$, і нижня $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$ функції приналежності визначають нормальні випуклі ІНМТ1 на непустому носії, причому в разі ТНЧ ІНМТ2 це будуть унімодальні нормальні випуклі ІНМТ1.

Таким чином, пропонується формально FOU ТНЧ ІНМТ2 $\tilde{A}_\Delta$ представлення у вигляді кортежу з параметрами [21]:

$$FOU(\tilde{A}_\Delta) = \langle \alpha_{\mu}^-, \alpha_{\mu}^-, a_{\mu}^-, a_{\mu}^-, b_{\mu}^-, b_{\mu}^-, \beta_{\mu}^-, \beta_{\mu}^- \rangle, \quad (1)$$

де α_{μ}^- – лівий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$; α_{μ}^- – лівий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$; a_{μ}^- – центр (мо-

дальне значення) $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$; a_{μ}^- – центр (модальне значення) $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$; β_{μ}^- – правий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$; β_{μ}^- – правий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Delta}$.

При цьому, трикутна верхня функція приналежності $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Delta} FOU(\tilde{A}_\Delta)$ породжує нормальну унімодальну випуклу ІНМТ1 на непустому носії – відкритому інтервалі $[a_{\mu}^- - \alpha_{\mu}^-, a_{\mu}^- + \beta_{\mu}^-]$, а трикутна нижня функція приналежності $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Delta} FOU(\tilde{A}_\Delta)$ породжує нормальну унімодальну випуклу ІНМТ1 на непустому носії – відкритому інтервалі $[a_{\mu}^- - \alpha_{\mu}^-, a_{\mu}^- + \beta_{\mu}^-]$.

Також пропонується формально представлення FOU ТНІ ІНМТ2 в вигляді кортежу з наступними параметрами,

$$FOU(\tilde{A}_\Pi) = \langle \alpha_{\mu}^-, \alpha_{\mu}^-, a_{\mu}^-, a_{\mu}^-, b_{\mu}^-, b_{\mu}^-, \beta_{\mu}^-, \beta_{\mu}^- \rangle, \quad (2)$$

де α_{μ}^- – лівий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Pi}$; α_{μ}^- – лівий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Pi}$; a_{μ}^- – нижнє модальне значення $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Pi}$; a_{μ}^- – нижнє модальне значення $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Pi}$; b_{μ}^- – верхнє модальне значення $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Pi}$; b_{μ}^- – верхнє модальне значення $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Pi}$; β_{μ}^- – правий коефіцієнт нечіткості $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Pi}$; β_{μ}^- – правий коефіцієнт нечіткості $\underline{\mu}_{\tilde{A}\Pi}$.

При цьому, трапецієвидна верхня функція приналежності $\bar{\mu}_{\tilde{A}\Pi} FOU(\tilde{A}_\Pi)$ породжує нор-

мальне випукле НМТ1 на непустому носії – відкритому інтервалі $\left[a_{\mu}^{-} - \alpha_{\mu}^{-}, b_{\mu}^{-} + \beta_{\mu}^{-} \right]$, а трапецієвидна нижня функція приналежності $\mu_{\tilde{A}_{\Pi}}$ породжує нормальне унімодальне випукле НМТ1 на непустому носії – відкритому інтервалі. Таким чином, метод формалізації знань про процес планування польоту БПЛА на основі ІНМТ2 включає наступні основні етапи (рис. 2):

- представлення факторів, що враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА у вигляді визначення лінгвістичної змінної (ЛЗ) для кожного варіанту, що прогнозується;
- формування області ЛЗ, що використовують для опису тактичних умов проведення повітряної розвідки та впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА;
- формування області ЛЗ, що використовують для опису тактичних умов проведення повітряної

розвідки та впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА;

- формування для кожної ЛЗ терм-множини, в якості елементів якої використовують найменування нечіткої змінної (НЗ), що описують лінгвістичні значення тактичних умов проведення повітряної розвідки, впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА;
- опис маршрутів польоту БПЛА для кожного можливого варіанту бойового порядку, впливу зовнішнього середовища;
- формування з множини найважливіших об'єктів повітряної розвідки найбільш значимих наземних об'єктів на основі оцінки міри недомінуєності елементів;
- представлення варіантів бойового порядку, впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА, доцільного маршруту польоту БПЛА у вигляді нечітких продукційних правил, де в якості антецедента, консеквента використовують нечіткі лінгвістичні висловлювання.

Рис. 2. Структура метода формалізації знань про процес планування польоту БПЛА на основі ІНМТ2 в ході підготовки до ведення повітряної розвідки
Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, формальний опис j -ої комбінації сукупності факторів, що враховують тактичні умови проведення розвідки та вплив зовнішнього середовища ($c_j^P \in C_P, j = 1 \dots m$), представляється у вигляді короткежу відповідно до виразів

$$c_j^P = \left\langle FOU\left(\tilde{A}_{\Pi i}^{POY^P}\right), FOU\left(\tilde{A}_{\Delta i}^{ШСР^P}\right), FOU\left(\tilde{A}_{\Delta s}^{ППО^P}\right), FOU\left(\tilde{A}_{\Delta k}^{ЗС^P}\right) \right\rangle; \quad (3)$$

$$c_j^P = \left\langle \alpha_i^{POY^P}, \alpha_i^{ШСР^P}, \alpha_s^{ППО^P}, \alpha_k^{ЗС^P} \right\rangle, \quad (4)$$

де $\tilde{A}_{\Pi i}^{POY^P}$ – ТНІ ІНМТ2 представляє дані про район особливої уваги, що описують можливі значення глибини ведення повітряної розвідки, відповідні НЗ з найменуванням $\alpha_i^{POY^P}$; $\tilde{A}_{\Delta i}^{ШСР^P}$ – ТНЧ ІНМТ2 представляє дані про прогнозовану ширину смуги повітряної розвідки і описує можливі значення

відповідної НЗ з найменуванням $\alpha_i^{ШСР^P}$; $\tilde{A}_{\Delta s}^{ППО^P}$ – ТНЧ ІНМТ2 представляє дані про можливі засоби ППО противника і описує можливі значення відповідної НЗ з найменуванням $\alpha_s^{ППО^P}$; $\tilde{A}_{\Delta k}^{ЗС^P}$ – ТНЧ ІНМТ2 представляє дані про можливі зміни дальності польоту БПЛА, що отримані в результаті логічного виводу при відповідних значеннях висоти, швидкості, напрямку вітру, температури повітря, і описує можливі значення відповідної НЗ з найменуванням $\alpha_k^{ЗС^P}$.

Опис факторів, що характеризують тактичну обстановку та вплив зовнішнього середовища, згідно виразу (3), є формальним представленням з точки зору подальшого використання методів нечіткого логічного виводу в рамках нечітких логічних систем інтервального типу 2, а опис згідно виразу (4) є більш зручним для безпосереднього представлення знань експертами в заданій

предметній області.

Тоді, згідно з виразів (3–4) опис факторів, що враховують тактичні умови проведення розвідки, вплив зовнішнього середовища $c_1^p \in C_p$ можливо представити у вигляді кортежу:

$$c_1^p = \left\langle \begin{matrix} FOU\left(\tilde{A}_{\Pi}^{POY^P}\right), FOU\left(\tilde{A}_{\Delta 5}^{ШСР^P}\right) \\ FOU\left(\tilde{A}_{\Delta 3}^{ППО^P}\right), FOU\left(\tilde{A}_{\Delta 3}^{ЗС^P}\right) \end{matrix} \right\rangle, \quad (5)$$

або у вигляді кортежу

$$c_1^p = \left\langle \begin{matrix} \alpha_1^{POY^P} = \text{"в діапазоні } 0,2; 0,3-2,0; 2,1 \text{ км"}, \\ \alpha_2^{ШСР^P} = \text{"мала"}, \\ \alpha_3^{ППО^P} = \text{"дуже мала"}, \\ \alpha_4^{ЗС^P} = \text{"мала"} \end{matrix} \right\rangle. \quad (6)$$

Відзначимо, що розглянуті ІНМТ2, що використані в якості значень відповідних НЗ, обрані умовно як приклад. Формальне представлення прогнозованих факторів, як сукупності нечітких продукційних правил R , для подальшого формування бази правил в рамках розробленого методу здійснюється у вигляді

$$\begin{aligned} R: & \text{IF } \beta_1 \text{ is } \alpha_1 \text{ AND } \dots \text{ AND } \beta_n \text{ is } \alpha_n \\ & \text{THEN } \beta_{n+1} = \alpha_j^p, \end{aligned} \quad (7)$$

де β_i – найменування вхідних ЛЗ, що задаються кортежем $\langle \beta_i, T_i, X_i, M_i \rangle$, $i = 1, \dots, n$ і n – кількість вхідних ЛЗ; $T_i = \{ \alpha_i \}$ – множина значень (термів) вхідної ЛЗ правила R , що задається кортежем $\langle \alpha_i, X_i, \tilde{A} \rangle$, $i = 1, \dots, n$, де $\tilde{A} \subseteq X_i$, $\tilde{A} = \{ x, \mu_{\tilde{A}}(x) \}$ або $\tilde{A} = \{ ((x, u), 1) \mid \forall x \in X_i, \forall u \in J_x \subseteq U = [0, 1] \}$ – ІНМТ2 на множині X_i , описує можливі значення, які може приймати НЗ $\alpha_i \in T_i$; M_i – семантична процедура, яка ставить у відповідність значенням ЛЗ нечітку множину. Відзначимо, що синтаксична процедура генерування нових значень для ЛЗ G_i не використовується, так як всі значення ЛЗ в рамках запропонованого підходу визначаються на етапі формування бази правил; β_{n+1} – найменування вихідної ЛЗ “Доцільний маршрут польоту”, що задається кортежем:

$$\langle \beta_{n+1}, T_{n+1}, Y, M_{n+1} \rangle, \quad (8)$$

де $T_{n+1} = A_p = \{ \alpha_j^p \}$ – множина значень (термів)

вихідної ЛЗ правила R , кожне з яких представляє собою рекомендацію по використанню доцільної стратегії польоту БПЛА з урахуванням виду операції;

Y – область значень термів, найменування яких входять в T_{n+1} , що представляють номер стратегії;

M_{n+1} – семантична процедура, яка має у відповідність значенням ЛЗ одноточечну нечітку множину;

α_j^p – значення терма вихідної ЛЗ у вигляді найменування з множини $A_p = \{ \alpha_j^p \}$, $j = 1, \dots, m$, m – кількість маршрутів.

Висновки

Таким чином, досліджено, що для задачі планування маршруту польоту БПЛА на етапі планування повітряної розвідки доцільно використовувати евристичні методи, які шукають рішення у деякому підпросторі можливих прийнятних рішень і вони є найкращими з точки зору врахування практики, досвіду, інтуїції, знань ОПР при веденні повітряної розвідки. Значення окремих прогнозованих факторів доцільно представляти з використанням математичного апарату нечітких множин. Розроблений метод формалізації знань про процес планування польоту БПЛА на основі ІНМТ2 дозволяє формалізувати фактори, що враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА у вигляді лінгвістичних і інтервально-оцінюваних параметрів для кожного варіанту, які враховують невизначеність; формувати область визначення лінгвістичних змінних, що використовують для опису тактичних умов проведення повітряної розвідки та впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА; формувати з множини найважливіших об’єктів повітряної розвідки множину найбільш значимих наземних об’єктів на основі оцінки міри невідомості елементів; формалізувати маршрути польоту БПЛА для кожного можливого варіанту бойового порядку, впливу зовнішнього середовища у вигляді нечітких продукційних правил, де в якості антецедента, консеквента використовують нечіткі лінгвістичні висловлювання.

Список літератури

1. Аналіз застосування безпілотних літальних апаратів в сучасних збройних конфліктах та АТО на Сході України / В.В. Камінський, В.В. Тюрін, О.А. Коршець, Н.О. Королюк // Наука і оборона. – 2017. – № 3(4). – С. 4-8.
2. Степанов Г.С. Погляди щодо проблемних питань застосування Повітряних Сил в протиповітряній обороні / Г.С. Степанов, В.В. Камінський, М.А. Павленко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № (30). – С. 18-23. <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.30.03>.

3. Камінський В.В. Боротьба з повітряним тероризмом має починатися з землі / В.В. Камінський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 16-23.
4. Олизаренко С.А. Нечеткие множества типа 2. Терминология и представление / С.А. Олизаренко, Е.В. Брежнев, А.В. Перепелица // Системи обробки інформації. – 2010. – № 8(89). – С. 131-140.
5. Олизаренко С.А. Интервальные нечеткие множества типа 2. Терминология, представление, операции / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // Системи обробки інформації. – 2011. – № 2(92). – С. 39-45.
6. Обґрунтування сучасного підходу щодо автоматизації процесів прийняття рішень по управлінню авіацією апарату / Н.О. Королюк, О.В. Першин, Т.О. Гріднєва, С.О. Шевченко, М.С. Агапов // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2019. – № 1(59). – С. 32-39. <https://doi.org/10.30748/zhups.2019.59.04>.
7. Saaty T. Structures in decision making: On the subjective geometry of hierarchies and networks / T. Saaty // European Journal of Operational Research. – 2009. – № 199(3). – P. 867-872.
8. Королюк Н.О. Процедура формалізації даних, які використовуються при описі процесу управління рухом повітряних об'єктів / Н.О. Королюк, Р.В. Корольов, О.А. Коршець // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2017. – № 4(53). – С. 103-106.
9. Korolyuk N. An approach to prediction of the telecommunication network quality parameters under the conditions of non-stochastic uncertainty / N. Korolyuk // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – № 76. – P. 1027-1032.
10. Королюк Н.О. Удосконалення програмного забезпечення комплексів засобів автоматизації при розпізнаванні типу повітряного об'єкта / Н.О. Королюк, В.В. Синявський, Д.О. Хаустов // Системи озброєння і військової техніки. – 2017. – № 1(49). – С. 67-80.
11. Тимочко О.І. Метод оцінки ступеня небезпеки нештатних ситуацій у повітряному просторі / О.І. Тимочко, П.П. Зуєв // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 1(26). – С. 49-53. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.10>.
12. Теоретические основы автоматизации процессов выработки решений в системах управления / В.Е. Ярушек, В.П. Прохоров, А.В. Мишин, Б.Н. Судаков. – Х.: ХУВС, 2011. – 355 с.
13. Ротштейн О.П. Діагностика на базі нечітких відношень в умовах невизначеності: монографія / О.П. Ротштейн, Г.Б. Ракитянська. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2006. – 275 с.
14. Korolyuk N. Hybrid model of knowledge for situation recognition in airspace / N. Korolyuk // Automatic Control and Computer Sciences. – 2014. – № 49. – P. 16-25.
15. Selecting a model of unmanned aerial vehicle to accept it for military purposes with regard to expert data / A. Alimpiev, P. Berdnik, N. Korolyuk, O. Korshets, M. Pavlenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 1(85). – P. 53-60.
16. Hnagras H. Introduction to Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers – Towards Better Uncertainty Handling in Real World Applications [Electronic resource] / Hani Hnagras, Christian Wagner // Systems, Man and Cybernetics Society. – 2009. – Issue 27. – Available at: <http://repository.essex.ac.uk/4281/>.
17. Mendel J.M. Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple / J.M. Mendel, R.I. John, Feilong Liu // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2006. – № 6(14). – P. 808-821.
18. Пермяков О.Ю. Інформаційно-телекомунікаційні технології і сучасна збройна боротьба / О.Ю. Пермяков, Н.О. Королюк // Науково-технічна конференція молодих учених “Актуальні проблеми інформаційних технологій”. – Київ, 20-21 листопада 2018 р. – С. 5-6.
19. Mendel J.M. Standard Background Material About Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems [Electronic resource] / J.M. Mendel, H. Hnagras, R.I. John // IEEE CIS Standards Committee. – 2020. – Available at: <http://ieeecs.org/technical/standards/>.
20. Wu H. Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / H. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – October 2002. – № 5(10). – P. 622-639.
21. Wu D. Enhanced Karnik-Mendel Algorithms / D. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – August 2009. – № 4(17). – P. 923-934.
22. Mendel J.M. On centroid calculations for Type-2 Fuzzy Sets / J.M. Mendel // Applied Mathematics and Computation. – 2011. – № 1(10), Special Issue. – P. 88-96.

Надійшла до редколегії 04.05.2020

Схвалено до друку 09.06.2020

Відомості про авторів:

Дудко Марина Валеріївна

науковий співробітник Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2010-1779>

Полонський Юрій Іванович

кандидат технічних наук
доцент кафедри
Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8569-400X>

Information about the authors:

Maryna Dudko

Research Associate of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2010-1779>

Yurii Polonskyi

Candidate of Technical Sciences
Senior Lecturer
of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8569-400X>

Корольок Наталія Олександрівна

кандидат технічних наук доцент
заступник начальника кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2865-5899>

Natalia Korolyuk

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Deputy Chief of Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2865-5899>

Коршець Олена Антонівна

кандидат технічних наук
заступник начальника кафедри
Національного університету
оборони України ім. І. Черняхівського,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7225-0848>

Olena Korshets

Candidate of Technical Sciences
Deputy Chief of Department
of Ivan Chernyakhovsky
National Defense University of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7225-0848>

МЕТОД ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ ПРО ПРОЦЕСС ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ТИПА 2

М.В. Дудко, Ю.И. Полонский, Н.А. Корольок, Е.А. Коршець

В статье предлагается подход по формализации знаний о процессе планирования маршрута полета беспилотного летательного аппарата на этапе планирования воздушной разведки с помощью эвристических методов, которые являются лучшими с точки зрения учета практики, опыта, интуиции, знаний лиц, принимающих решения, при ведении воздушной разведки. Применение беспилотного летательного аппарата в условиях требований и ограничений, летно-технических возможностей беспилотного летательного аппарата, наличие средств поражения противника предполагает большое множество вариантов маршрута полета, что обуславливает сложность в принятии обоснованного решения по построению оптимального маршрута полета беспилотного летательного аппарата. Как показывает опыт практического применения БПЛА, условия, требования, ограничения, предъявляемые к разведывательным задачам, влияние внешних факторов, учет важнейших объектов для облета, могут противоречить друг другу, создавая неопределенность при предоставлении приоритета любому из них при планировании. Разработанный метод формализации знаний о процессе планирования полета БПЛА на основе ИНМТ2 позволяет формализовать факторы, учитывающие тактические условия проведения воздушной разведки, влияние внешней среды на дальность полета беспилотного летательного аппарата в виде лингвистических и интервально-оцениваемых параметров для каждого варианта, которые позволяют учесть неопределенность; формировать область определения лингвистических переменных, используемых для описания тактических условий проведения воздушной разведки и влияния внешней среды на дальность полета беспилотного летательного аппарата; формировать из множества важнейших объектов воздушной разведки наиболее значимых наземных объектов на основе оценки степени недоминимости элементов; формализовать стратегии полета беспилотного летательного аппарата для каждого возможного варианта оперативного построения, влияния внешней среды в виде нечетких продукционных правил, где в качестве антецедента, консеквента используют нечеткие лингвистические выражения.

Ключевые слова: планирование маршрута полета, интервальные нечеткие множества типа 2, лицо, принимающее решение, нечеткая логическая система, треугольные нечеткие числа, трапецевидные нечеткие интервалы, знания, формализация знаний.

METHOD OF FORMALIZING KNOWLEDGE ABOUT THE PROCESS OF PLANNING THE FLIGHT ROUTE OF A UNMANNED AERIAL VEHICLE BASED ON INTERVAL FUZZY SETS OF TYPE 2

M. Dudko, Yu. Polonskyi, N. Korolyuk, O. Korshets

The article proposes an approach to formalizing knowledge of planning the flight route of an unmanned aerial vehicle at the planning stage of aerial reconnaissance using heuristic methods that are best in regard to practice, experience, intuition, knowledge of decision makers in conducting aerial reconnaissance. The use of an unmanned aerial vehicle in the conditions of requirements and restrictions, the flight and technical capabilities of an unmanned aerial vehicle, the presence of enemy weapons means a large number of flight route options, which makes it difficult to make an informed decision on constructing an optimal flight route for an unmanned aerial vehicle. The experience of the practical use of unmanned aerial vehicles shows that the conditions, requirements, restrictions imposed on reconnaissance missions, the influence of external factors, and the consideration of the most important objects for overflights can contradict each other, creating uncertainty when giving priority to any of them during planning. The developed method of formalizing knowledge about the unmanned aerial vehicle flight planning process based on interval fuzzy sets of type 2 allows us to formalize factors that consider the tactical conditions of aerial reconnaissance, the influence of the external environment on the flight range of an unmanned aerial vehicle in the form of linguistic and interval-evaluated parameters for each option, which allow us to take into account the uncertainty; to form a domain for determining the linguistic variables used to describe the tactical conditions for conducting air reconnaissance and the influence of the environment on the flight range of an unmanned aerial vehicle to form from the set of the most important aerial reconnaissance objects the most significant ground-based objects on the basis of an assessment of the degree of element inevitability; formalize the flight strategies of an unmanned aerial vehicle for each possible variant of operational construction, the influence of the external environment in the form of fuzzy production rules, where fuzzy linguistic expressions are used as antecedent, consequent.

Keywords: flight route planning, interval fuzzy sets of type 2, decision maker, fuzzy logic system, triangular fuzzy numbers, trapezoidal fuzzy intervals, knowledge, knowledge formalization.