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

УДК 627.01

DOI: 10.30748/zhups.2020.64.07

В.Я. Горбач, Ю.Л. Бондаренко

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова, Житомир

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛАНУ МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ РОЗВІДУВАЛЬНОГО БПЛА І КЛАСУ

У статті вдосконалено методику оцінювання ефективності плану маршруту польоту безпілотного літального апарата (БПЛА) І класу із використанням визначених показників. Обґрунтовано систему критеріїв ефективності планування та доцільність розрахунку узагальненого показника ефективності. Наведено порядок оцінювання плану маршруту польоту із використанням нормованого узагальненого показника ефективності. Обґрунтовано схему визначення узагальненого показника та порядок оцінювання плану маршруту польоту БПЛА І класу із використанням лінгвістичної шкали.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, план маршруту польоту, показники планування, критерії ефективності, нелінійна схема компромісів, лінгвістична шкала.

Вступ

Постановка проблеми. Необхідність розвідувального забезпечення дій військ в умовах збройної агресії Російської Федерації на Сході України зумовила постановку на озброєння вітчизняних та закордонних зразків розвідувальних безпілотних авіаційних комплексів (БПАК) І класу. Вони широко застосовуються для добування розвідувальних відомостей в операції Об'єднаних сил (ООС). Проте існує ряд чинників, від яких залежить успіх виконання розвідувальних завдань, таких як: якісне планування маршруту польоту, рівень підготовки обслуги БПАК щодо планування маршруту польоту, наявність програмно-математичних засобів автоматизації планування маршруту польоту, вплив засобів протиповітряної оборони (ППО) противника.

Проаналізувавши практичний досвід застосування та причини втрат БПЛА І класу в ООС [1], можна зробити висновок, що існує необхідність удосконалення програмно-математичних засобів автоматизації планування маршруту польоту.

На даний час обслуги під час планування застосування розвідувальних БПЛА І класу здійснюють вибір маршрутів польоту виходячи з особистого досвіду, так, адже наявні засоби автоматизації планування не повною мірою враховують умови завдання. Зокрема, велика кількість даних щодо маршруту польоту, врахування технічних можливостей БПАК, факторів впливу, передбачає наявність знач-

ної кількості варіантів плану маршруту польоту для виконання одного завдання. Виникає потреба вибору одного, оптимального для заданих умов.

Існує ряд програмних засобів автоматизації планування маршруту польоту БПЛА І класу. Проте вони не дозволяють здійснювати оцінювання варіантів планів маршруту польоту для ефективного застосування розвідувальних БПАК у заданих умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виходячи зі специфіки завдань розвідки БПЛА І класу [1], вимог до планування маршруту польоту [2–4], нормативних документів застосування авіаційної техніки [5–8], технічних можливостей БПАК, існує значна кількість показників, які впливають на ефективність плану маршруту польоту. Проте у наявних програмних засобах планування надається перевага лише критерію часу виконання розвідувального завдання [9; 10]. Зокрема, програмні засоби такі, як: Mission Planer, eMotion AG-SenseFly, UgCS PC Mission Planning, DJI Ground Station Pro, mdCockpit не пристосовані до врахування впливу засобів ППО противника, можливості розрахунку ймовірності розпізнавання та пріоритету об'єктів розвідки (ОР) противника.

У [9; 11–12] досліджуються варіанти підвищення ефективності планування розвідки БПАК шляхом розрахунку показників, які відображають технічні можливості цільового навантаження. Перевагою даного підходу є точність розрахунку оптимальної висоти польоту літального апарату (ЛА) виходячи із

умов завдання. Натомість, як недолік можна виділити відсутність урахування впливу засобів ППО противника, ймовірність ураження, яких змінюється із висотою.

У працях [13–14] наводяться методики розрахунків ефективності розвідки БпЛА. Проте визначені показники дозволяють оцінювати ефективність застосування після проведення польоту БпЛА шляхом порівняння їх з еталонними (заданими). Даний підхід ефективний лише для аналізу результатів та має низьку пристосованість до використання в умовах невизначеності.

Як загальний недолік можна виділити те, що жоден із запропонованих підходів не дозволяє отримувати одну, загальну оцінку плану, яка відображає всі основні критерії ефективності плану маршруту польоту БпЛА I класу.

Отже, як показав аналіз публікацій, проблема оцінювання плану маршруту польоту БпЛА I класу, має важливість для науки і практики, залишається актуальною та потребує розв'язання.

Мета статті – удосконалення методики оцінювання ефективності плану маршруту польоту розвідувального БпЛА I класу шляхом розрахунку узагальненого показника ефективності та застосування лінгвістичної шкали оцінювання.

Виклад основного матеріалу

Для вдосконалення методики, метою якої є оцінювання ефективності планування маршруту польоту розвідувального БпЛА класу I, доцільно застосувати підхід [15]. Він дозволяє розглядати вирішення даної задачі, як багатоетапний процес, який містить:

- тактичні показники, які висуваються у вигляді спеціальних завдань (можлива кількість ОР, якість розвідувальної інформації, ймовірна кількість розвіданих об'єктів);
- показники, які відображають технічні можливості БпЛА щодо виконання спеціальних завдань (ймовірність ураження БпЛА засобами ППО, загальний час польоту, показники, які відображають можливості цільового навантаження);
- умови проведення розвідувального польоту.

Зважаючи на вимоги розвідувального завдання, тактико-технічні характеристики БпЛА I класу, розвідувальні можливості цільового навантаження, існує велика кількість варіантів маршруту польоту БпЛА.

Для перевірки ефективності та адекватності розрахунків щодо планування маршруту польоту БпЛА I класу пропонується вдосконалення наявних методик шляхом визначення основних показників ефективності планування маршруту польоту, їх узагальнення та оцінювання за лінгвістичною шкалою.

Для вирішення даного завдання необхідно із множини показників, які визначають ефективність плану маршруту польоту БпЛА, обрати такі, які максимально відображатимуть загальний результат ефективності плану [16]. Враховуючи [5; 10–12; 14; 16] та беручи до уваги [22; 23], для якісної оцінки ефективності плану маршруту польоту БпЛА I доцільно застосувати такі показники:

Ймовірність ураження БпЛА – $P_{\text{ураж}}^{\text{БпЛА}}$ (за наявності засобів ППО противника в районі ведення повітряної розвідки). Даний показник має велике значення, зважаючи на високу вартість та низьку пристосованість БпЛА I класу до протидії ППО противника.

Ймовірність розпізнавання ОР противника – $P_{\text{роз}}^{\text{ОР}}$ [10].

Досвід практичного застосування БпЛА I класу свідчить про необхідність урахування даного показника у зв'язку із необхідністю розпізнавання отриманої інформації із заданою роздільною здатністю.

Він залежить від висоти польоту, заданої роздільної здатності знімка та технічних параметрів цільового навантаження.

Загальний час виконання розвідувального завдання – $T_{\text{заг}}$. Даний показник відображає ресурс ЛА щодо тривалості польоту та є обов'язковим для врахування під час розрахунку плану.

Досвід застосування БпЛА в ООС [1] свідчить, що неврахування цього показника під час розрахунків плану маршруту польоту неодноразово призводило до втрати ЛА на території противника.

Загальна кількість ОР противника та їх пріоритет щодо черговості розвідки – $N_{\text{ОР}}, K_{\text{ОР}}$.

Залежно від вимог розвідувального завдання, можуть існувати умови, коли загальна кількість ОР противника перевищує технічні можливості БпЛА щодо їх розвідки в межах одного вильоту.

Тому виникає необхідність виокремлення ОР із низьким пріоритетом для проведення другого польоту. Дані показники відображають відповідність плану маршруту польоту висунутим вимогам розвідувального завдання щодо ОР.

Отже, виходячи з вимог розвідувального завдання технічних можливостей БпЛА та обмежень щодо виконання завдань розвідки, ефективність плану маршруту польоту БпЛА I визначатимемо за такими основними показниками ефективності:

$$P_m = \{P_{\text{ураж}}^{\text{БпЛА}}, P_{\text{роз}}^{\text{ОР}}, T_{\text{заг}}, N_{\text{ОР}}, K_{\text{ОР}}\}.$$

З урахуванням обраних показників вираз ефективності планування маршруту польоту матиме вигляд:

$$E(P_M) = F[P_{\text{ураж}}^{\text{БнЛА}}(P_M), P_{\text{розп}}^{\text{OP}}(P_M), T_{\text{заг}}(P_M), N_{\text{OP}}(P_M), K_{\text{OP}}(P_M)], \quad (1)$$

де P_M – вихідна змінна (варіант плану маршруту польоту БпЛА), яка виражається набором критеріїв, що впливають на кінцевий варіант плану;

$E(P_M)$ – показник ефективності планування маршруту польоту БпЛА.

Критерії ефективності планування маршруту польоту розвідувального БпЛА I класу обумовлюються [1; 2–4; 17–19; 21–23]: розвідувальним завданням; можливостями противника щодо зриву розвідувального завдання; часовими параметрами планування та (або) виконання розвідувального завдання; параметрами, які визначають технічні можливості БпАК. Виходячи з фізичної суті та напрямків екстремізації, система критеріїв оцінювання ефективності плану маршруту польоту БпЛА I класу матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} P_{\text{ураж}}^{\text{БнЛА}} \rightarrow \min, \\ P_{\text{розп}}^{\text{OP}} \rightarrow \max, \\ T_{\text{заг}} \rightarrow \min, \\ N_{\text{OP}} \rightarrow \max, \\ K_{\text{OP}} \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2)$$

Для проведення оцінювання введемо поняття узагальненого критерію ефективності, який є функцією часткових критеріїв.

У такому разі план маршруту польоту можна представити у вигляді функціональної залежності [10; 17]:

$$P_M = F(K_1, K_2, \dots, K_n), \quad K_i \in \Omega, \quad n = [1, n]; \quad (3)$$

$$K_i = f(k_1, k_2, \dots, k_w), \quad k_i = [1, w], \quad (4)$$

де K_i – критерій ефективності планування, який може змінюватись в деякій області Ω ;

n – кількість основних критеріїв ефективності планування;

Ω – область можливих значень критеріїв планування маршруту польоту БпЛА, обмежена умовами перебігу розвідувального завдання з БпАК;

k_i – показник (параметр), який відображає вплив на політ БпЛА;

w – кількість показників (параметрів), які характеризують критерій ефективності планування.

Формування функції ефективності $F(K_i)$ для альтернатив деякій області Ω відбувається за рахунок згортання векторного критерію F в скалярний за допомогою різного виду згорток [15; 18], зокрема

– адитивної:

$$F(K_i) = \sum_{i=1}^w \lambda_i K_i, \quad \sum_{i=1}^w \lambda_i = 1, \quad (5)$$

де λ_i – ваговий коефіцієнт переваги показника ефективності;

– мультиплікативної:

$$F(K_i) = \prod_{i=1}^w K_i^{\lambda_i}, \quad \sum_{i=1}^w \lambda_i = 1, \quad (6)$$

– адитивно-мультиплікативної:

$$F(K_i) = \sum_{i=1}^w \lambda_i K_i + \prod_{i=1}^w K_i^{\lambda_i}, \quad \sum_{i=1}^w \lambda_i = 1, \quad (7)$$

та похідних від даних згорток, виходячи із специфіки вирішуваних завдань.

Загальним недоліком таких методів згортки є, зокрема, те, що недостатнє значення одного критерію корисності відносно іншого може бути компенсоване збільшенням значення іншого критерію. Також існують обмеження щодо їх односпрямованості. Застосування даних згорток не доцільне для пошуку оптимальних варіантів плану маршруту польоту БпЛА, оскільки адитивну згортку не доцільно використовувати для відшукування оптимумів взаємопов'язаних критеріїв. Мультиплікативна згортка має високу чутливість до зміни значень показників, тому незначна зміна параметрів призводить до неадекватної зміни результату узагальненого показника.

Підхід [15] базується на об'єднанні багатьох критеріїв якості системи в один, використовує нелінійну схему компромісів і дозволяє формально одержати оптимальне (по відношенню до висунутих критеріїв) рішення. Порівняно з великою кількістю інших схем оптимізації, разом із загальними недоліками, він має такі переваги:

– оптимізаційне завдання розв'язується за наявності обмежень, що в будь-якому випадку гарантує отримання рішення;

– метод гарантує унімодальність результуючого функціонала;

– невелика обчислювальна складність алгоритму пошуку рішення.

Тому для даного набору критеріїв доцільно застосувати згортку за нелінійною схемою компромісів [11–15; 20]:

$$E(P_M) = \sum_{i=1}^w \lambda_i [1 - K_{0i}^H]^{-1}, \quad \sum_{i=1}^w \lambda_i = 1, \quad (8)$$

де $P_M = \{k_w\}_{i=1}^w$ – Ω -вимірний вектор показників ефективності;

K_{0i}^H – нормований показник ефективності;

Загальні показники плану маршруту польоту БпЛА, нормуватимемо відповідно до [15; 21; 23]:

$$\bar{P}_{\text{ураж}}^{\text{БнЛА}(n)} = P_{\text{ураж}}^{\text{БнЛА}}, \quad \bar{P}_{\text{ураж}}^{\text{БнЛА}(n)} \in [1..0], \quad (9)$$

де $P_{\text{ураж}}^{\text{БпЛА}}$ – розраховане значення показника – ймовірність ураження БпЛА;

$$\bar{T}_{\text{заг}}^H = \frac{T_{\text{заг}}}{T_{\text{заг}}^{\max}}, \quad \bar{T}_{\text{заг}}^H \in [1..0], \quad (10)$$

де $T_{\text{заг}}, T_{\text{заг}}^{\max}$ – розраховане та максимальне значення показника – загальний час ведення розвідки відповідно;

$$\bar{P}_{\text{розп}}^{OP(n)} = 1 - P_{\text{розп}}^{OP}, \quad \bar{P}_{\text{розп}}^{OP(n)} \in [1..0], \quad (11)$$

де $P_{\text{розп}}^{OP}$ – розраховане значення показника – ймовірність розпізнавання ОР;

$$\bar{K}_{OP}^H = 1 - \frac{K_{OP}}{K_{OP}^{\max}}, \quad \bar{K}_{OP}^H \in [1..0], \quad (12)$$

де $K_{OP}, K_{OP}^{\max}$ – розраховане та максимальне значення показника – пріоритет об'єкта розвідки (цілі) відповідно;

$$\bar{N}_{OP}^H = 1 - \frac{N_{OP}}{N_{OP}^{\max}}, \quad \bar{N}_{OP}^H \in [1..0], \quad (13)$$

де $N_{OP}, N_{OP}^{\max}$ – кількість включених до плану та вказаних у розвідувальному завданні ОР противника відповідно.

Виходячи з визначених показників ефективності планування маршруту польоту БпЛА класу I, обраної схеми оптимізації та порядку нормування показників вираз для розрахунку значення узагаль-

неного показника ефективності планування матиме такий вигляд:

$$E(P_M) = \lambda_1 \frac{1}{1 - \bar{P}_{\text{ураж}}^{\text{БпЛА}(H)}} + \lambda_2 \frac{1}{1 - \bar{P}_{\text{розп}}^{OP(n)}} + \lambda_3 \frac{1}{1 - \bar{T}_{\text{заг}}^H} + \lambda_4 \frac{1}{1 - \bar{K}_{OP}^H} + \lambda_5 \frac{1}{1 - \bar{N}_{OP}^H}, \quad (14)$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ – вагові коефіцієнти переваги відповідних загальних показників ефективності.

Також до переваг обраної схеми оптимізації належить наявність вагових коефіцієнтів переваги показників. Даний коефіцієнт дає можливість особі, яка планує маршрут польоту, віддавати перевагу будь-якому показнику ефективності залежно від специфіки задач, що виконуються.

Поряд із цим, необґрунтоване надання переваги показнику може змінити загальний результат оптимізації.

Тому дані маніпуляції доцільно застосовувати особам зі значним практичним досвідом застосування розвідувальних БпЛА I класу.

За відсутності переваги показників

та умови $\sum_{i=1}^w \lambda_i = 1$, приймемо, що $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0,2$.

Розглянемо такі варіанти плану маршруту польоту БпЛА I класу за визначеними показниками та розрахуємо їх узагальнені показники ефективності за схемою [15]:

$$\begin{aligned} E_1 &= 0,2 \frac{1}{1-0,7} + 0,2 \frac{1}{1-0,3} + 0,2 \frac{1}{1-0,6} + 0,2 \frac{1}{1-0,4} + 0,2 \frac{1}{1-0,2} = 2,02, \\ E_2 &= 0,2 \frac{1}{1-0,4} + 0,2 \frac{1}{1-0,2} + 0,2 \frac{1}{1-0,5} + 0,2 \frac{1}{1-0,3} + 0,2 \frac{1}{1-0,5} = 1,66, \\ E_3 &= 0,2 \frac{1}{1-0,8} + 0,2 \frac{1}{1-0,5} + 0,2 \frac{1}{1-0,9} + 0,2 \frac{1}{1-0,6} + 0,2 \frac{1}{1-0,5} = 4,3, \\ E_4 &= 0,2 \frac{1}{1-0,3} + 0,2 \frac{1}{1-0,2} + 0,2 \frac{1}{1-0,4} + 0,2 \frac{1}{1-0,3} + 0,2 \frac{1}{1-0,2} = 1,39, \\ E_5 &= 0,2 \frac{1}{1-0,9} + 0,2 \frac{1}{1-0,5} + 0,2 \frac{1}{1-0,8} + 0,2 \frac{1}{1-0,5} + 0,2 \frac{1}{1-0,3} = 4,08, \\ E_6 &= 0,2 \frac{1}{1-0,95} + 0,2 \frac{1}{1-0,6} + 0,2 \frac{1}{1-0,8} + 0,2 \frac{1}{1-0,8} + 0,2 \frac{1}{1-0,6} = 7, \\ E_7 &= 0,2 \frac{1}{1-0,4} + 0,2 \frac{1}{1-0,1} + 0,2 \frac{1}{1-0,6} + 0,2 \frac{1}{1-0,3} + 0,2 \frac{1}{1-0,2} = 1,58. \end{aligned}$$

Дані розрахунків узагальнених показників ефективності планування маршруту польоту БпЛА I класу представимо у вигляді (табл. 1), де мінімальне значення узагальненого показника ефективності відповідатиме оптимальному плану маршруту польоту БпЛА. Розраховані узагальнені показники ефективності є оптимальними щодо висоти польоту БпЛА, та міні значення E (із властивостей обраної

згортки) відповідає оптимальному для даних варіантів маршруту польоту.

Інтерпретація отриманого рішення полягає в приведенні значення оцінки до єдиної шкали зміни, наприклад, від 0 (найгірша) до 1 (найкраща).

Це досягається шляхом нормування встановлення значення критеріїв оцінки в межах від 0 до 1 із найкращим значенням 1, найгіршим 0.

Таблиця 1

Дані розрахунків узагальнених показників ефективності планування маршруту польоту БпЛА I класу

Варіант плану	Значення показників ефективності планування					Узагальнений показник
	$P_{БпЛА \text{ ураж}}$	$P_{розн}$	$T_{заг}$	K_{OP}	N_{OP}	
1	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8	2,02
2	0,4	0,8	0,5	0,7	0,5	1,66
3	0,8	0,5	0,9	0,4	0,5	4,3
4	0,3	0,8	0,4	0,7	0,8	1,39
5	0,9	0,5	0,8	0,5	0,7	4,08
6	0,95	0,4	0,8	0,2	0,4	7
7	0,4	0,9	0,6	0,7	0,8	1,58

Абсолютна величина значень узагальнених показників ефективності не є показовою для прийняття рішення щодо ефективності ведення розвідки БпЛА за обраного варіанта набору показників. Тому для прийняття рішення про ефективність плану необхідно перейти від абсолютного значення узагальненого показника ефективності планування маршруту до лінгвістичної категорії “добре-погано” [24–25]. Нормування оцінки E здійснимо за виразом.

$$\bar{E}^n = \frac{E_{\min}}{E_i}, \quad \bar{E}^n \in [0,1], \quad i = [1..n], \quad (15)$$

де $E_{\min}$ – мінімальне значення узагальненого показника ефективності планування маршруту польоту БпЛА; E_i – розраховане значення узагальненого показника ефективності планування маршруту польоту БпЛА; n – кількість варіантів планів маршрутів польоту БпЛА, що оцінюються.

Нормований узагальнений показник оцінюється за лінгвістичною шкалою оцінювання ефективності плану маршруту польоту БпЛА (табл. 2).

Таблиця 2

Лінгвістична шкала оцінювання ефективності плану маршруту польоту БпЛА

Значення нормованого узагальненого показника	Категорія ефективності плану
0,7 - 1,0	Висока
0,5 - 0,7	Добра
0,4 - 0,5	Задовільна
0,2 - 0,4	Низька
0,0 - 0,2	Незадовільна

Значення розрахованих нормованих узагальнених показників накладемо на лінгвістичну шкалу та отримаємо оцінки за кожним із варіантів плану маршруту польоту БпЛА для заданих умов (табл. 3).

Таблиця 3

Лінгвістична шкала оцінювання ефективності планів маршруту польоту БпЛА

Варіант плану та відповідне йому значення $\bar{E}^n$	Категорія ефективності плану
P_1 0,68	Добра
P_2 0,83	Висока
P_3 0,32	Низька
P_4 1	Висока
P_5 0,34	Низька
P_6 0,19	Незадовільна
P_7 0,87	Висока

Застосування лінгвістичної шкали дозволяє здійснювати оцінювання ефективності плану маршруту польоту БпЛА за наявності множини варіантів планів, які відрізняються між собою значеннями розрахованих показників ефективності.

Порядок здійснення оцінювання ефективності плану маршруту польоту БпЛА I класу з урахуванням визначених показників від моменту отримання завдання до вильоту БпЛА наведено на (рис. 2).

Рис. 2. Порядок здійснення оцінювання ефективності плану маршруту польоту БпЛА I класу

Висновки

Удосконалено методику (9–15) оцінювання ефективності плану маршруту польоту БпЛА I класу, яка відрізняється від відомих урахуванням системи показників ефективності планування маршруту

польоту БпЛА і ґрунтується на розрахунку узагальненого показника ефективності за нелінійною схемою компромісів із подальшою оцінкою за лінгвістичною шкалою.

Дану методику доцільно використовувати під час планування маршруту польоту розвідувальних

БпЛА класу І для розвідки визначених об'єктів. Вони дає можливість оцінювання розрахованих планів маршруту польоту БпЛА І класу за визначеними показниками і дозволяє обирати оптимальний, із множини можливих, за визначеними показниками ефективності.

Застосування удосконаленої методики доцільне для автоматизованого робочого місця планування

маршрутів польоту БпЛА І класу зі спеціалізованим програмним забезпеченням. Надалі планується дослідження інших показників планування маршруту польоту щодо їх впливу на оптимальність маршруту польоту та автоматизація процесу вибору рішення щодо розвідки об'єктів противника, які знаходяться у зоні ураження БпЛА.

Список літератури

1. Офіційний сайт PRESSJFO.NEWS. Операція Об'єднаних сил. – Режим доступу: www.facebook.com/pg/pressjfo.news/posts/?ref=page_internal.
2. PD-1. Керівництво з льотної експлуатації БпЛА PD-1. – К., 2015. – 66 с.
3. Raven В. Малий безпілотний літальний апарат. Керівництво з експлуатації / В. Raven. – Житомир, 2015. – 164 с.
4. Лелека-100. Керівництво з технічної експлуатації. Інструкція з монтажу регулювання і запуску. – Дніпропетровськ, 2016. – 57 с.
5. ДСТУ 7371:2013. Техніка авіаційна військової призначеності. Апарати літальні безпілотні. – К., 2009. – 11 с.
6. Наказ Державної авіаційної служби України та Міністерства Оборони України “Про затвердження Авіаційних правил України № 430/210 від 11.05.2018” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE32508.html.
7. Наказ Міністерства Оборони України “Про затвердження Правил штурманського забезпечення польотів державної авіації України № 100 від 23.02.2016” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE28548.html.
8. Наказ Міністерства Оборони України “Про затвердження правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації № 661 від 08.12.2016” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE29899.html.
9. Луньов О.Ю. Методика визначення раціонального порядку застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів при виконанні завдань з припинення масових заворушень силами Національної гвардії України / О.Ю. Луньов, І.В. Ковальов, К.О. Споришев // Честь і закон. – 2018. – № 4(67). – С. 26-37.
10. Бондаренко Ю.Л. Удосконалена математична модель планування маршрутів польоту розвідувальних безпілотних літальних апаратів класу тактичні / Ю.Л. Бондаренко, С.О. Дупелич, В.Я. Горбач // Вісник Житомирського державного технічного університету. – 2019. – № 1(83). – С. 206-213. [https://doi.org/10.26642/tn-2019-1\(83\)-206-213](https://doi.org/10.26642/tn-2019-1(83)-206-213).
11. Кутельмах Р.К. Дослідження ефективності декомпозиційного алгоритму спільних ребер для розв'язування задачі комівояжера великих розмірностей / Р.К. Кутельмах, Б.В. Угриновський // Львівська політехніка. – 2017. – № 12(52). – С. 1-5.
12. Безпілотні літальні апарати: обґрунтування і розрахунок основних параметрів і характеристик / М.М. Мітрахович, В.І. Сілков, А.В. Самков, В.Б. Семенов. – К.: ЦНДІ ЗСУ, 2016. – 368 с.
13. Єфремов О.В. Методика оцінювання ефективності застосування підрозділів безпілотних авіаційних комплексів / О.В. Єфремов, В.М. Горбенко, О.А. Коршєць // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2018. – № 4(58). – С. 30-36. <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.58.04>.
14. Векторная оптимизация динамических систем / А.Н. Воронин, Ю.К. Зиятдинов, О.И. Козлов, В.С. Чабанюк; под ред. А.Н. Воронина. – К.: Техніка, 1999. – 284 с.
15. Стешенко П.М. Математична модель для оцінювання ефективності бойового застосування розвідувальних безпілотних авіаційних комплексів / П.М. Стешенко // Озброєння та військова техніка. – 2016. – № 2(10). – С. 25-28.
16. Вороніков В.В. Планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів шляхом розв'язання задачі комівояжера / В.В. Вороніков, І.В. Гуменюк, П.В. Поздняков // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2017. – № 4/2(36). – С. 1-13. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.
17. Hryshchuk R. Formalized resolution of the scientific task for improving the effective planning special purpose unmanned aerial vehicles routes of tactical level / R. Hryshchuk, Yu. Bondarenko, V. Horbach // Path of Science. – 2019. – № 1(5). – С. 1001-1007. <https://doi.org/10.22178/pos.42-1>.
18. Павлій В.О. Показники ефективності відновлення дефокусованих оптико-електронних зображень та зображень, що спотворені змазом / В.О. Павлій, О.М. Маковейчук, Г.В. Худов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2013. – № 3. – С. 106-112. – Режим доступу: www.nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2013_3_16.
19. Гуляницький Л.Ф. Прикладні методи комбінаторної оптимізації / Л.Ф. Гуляницький, О.Ю. Мулеса. – К.: Київський університет, 2016. – 142 с.
20. Сілков В.І. Система підтримки прийняття рішень при оперативній оцінці безпілотних авіаційних комплексів: Безпілотні авіаційні комплекси “Міні (тактичні поля бою)” / В.І. Сілков. – К.: ЦНДІ ОБТ, 2018. – 55 с.
21. Грабовецький Б.Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання: монографія / Б.Є. Грабовецький. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 171 с.
22. Елементи дослідження складних систем військового призначення / О.М. Загорка, С.П. Мосов, А.І. Сбитнев, П.І. Стужук. – К.: НАОУ, 2005. – 100 с.
23. Ключніков І.М. Підхід до формування критеріального апарату оцінки ефективності змішаних угруповань пілотованої та безпілотної авіації / І.М. Ключніков, В.О. Нерубацький, А.А. Шалигін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2019. – № 4(37). – С. 50-55. <https://doi.org/10.30748/ntps.2019.37.07>.
24. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 162 с.
25. Ishigami H. Structure optimization of fuzzy neural network by genetic algorithm / H. Ishigami, T. Fukuda, T. Shibata, F. Arai // Fuzzy Sets and Systems. – 1995. – № 71. – P. 257-264.

References

1. The official site of PRESSJFO.NEWS (2019), "Operaciya Ob'yednanih sil" [Joint Forces Operation], available at: www.facebook.com/pg/pressjfo.news/posts/?ref=page_internal.
2. PD-1 (2015), "Kerivnytsstvo z lotnoi ekspluatatsii" [UAC PD-1. Flight Operations Guide], Kyiv, 66 p.
3. Raven, B. (2015), "Malyi bezpilotnyi litalnyi aparat: Kerivnytsstvo z ekspluatatsii" [Small unmanned aerial vehicle: Operation manual], Zhytomyr, 164 p.
4. Leleka-100 (2016), "Kerivnytsstvo z tekhnichnoi ekspluatatsii. Instruktziia z montazhu rehuliuivanniu i zapusku" [Technical Operation Manual. Installation and adjustment instructions], Dnipropetrovsk, 57 p.
5. State Standard of Ukraine (2013), "7371:2013 V Tekhnika aviatsiina viiskovoi pryznachnosti. Aparaty litalni bezpilotni" [7371:2013 V Military aviation equipment. Unmanned aerial vehicles], Kyiv, 11 p.
6. The Order of the Ministry of Defense of Ukraine (2018), "Pro zatverdzhennya Aviacijnih pravil Ukrayini No. 430/210 vid 11.05.2018" [About the statement of Aviation rules of Ukraine No.430/210 dated 11.05.2018], available at: www.search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE32508.html.
7. The Order of the Ministry of Defense of Ukraine (2016), "Nakaz Derzhavnoi aviatsiinoi sluzhby Ukrainy ta Ministerstva Oborony Ukrainy No. 100 vid 23.02.2016" [On approval of the rules of navigation support for State Aviation of Ukraine № 100 dated 23.02.2016], available at: www.search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE28548.html.
8. The Order of the Ministry of Defense of Ukraine (2019), "Pro zatverdzhennya pravyl vykonannya polotiv bezpilotnymy aviatsiynymy kompleksamy derzhavnoi aviatsii № 661 vid 08.12.2016" [On approval rules performance of flights by unmanned aviation complexes state aviation № 661 dated 08.12.2016], available at: www.search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE28548.html.
9. Lunov, O.Yu., Kovalov, I.V. and Sporyshev, K.O. (2018), "Metodyka vyznachennia ratsionalnogo poriadku zastosuvannya rozviduvalnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ pry vykonanni zavdan z prypynnennia masovykh zavorushen sylamy Natsionalnoi Hvardii Ukrainy" [Methods of determining the rational order of use of reconnaissance unmanned aerial vehicles in performing tasks to stop mass disturbances by the National Guard of Ukraine], *Honor and Law*, No. 4 (67), pp. 26-37.
10. Bondarenko, Y.L., Dupelich, S.O. and Gorbach, V.Y. (2019), "Udoskonalena matematychna model planuvannya marshrutiv polotu rozviduvalnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ klasu taktychni" [Successful mathematical model for planning unmanned aerial vehicles routes of tactical level], *Bulletin of Zhytomyr Technological University*, No. 1(83), pp. 206-213. [https://doi.org/10.26642/tu-2019-1\(83\)-206-213](https://doi.org/10.26642/tu-2019-1(83)-206-213).
11. Kutelmakh, R.K. and Uhrynovskiy, B.V. (2017), "Doslidzhennia efektyvnosti dekompozytsiinoho alhorytmu spilnykh reber dlia rozviazuvannya zadachi komivoiazhera velykykh rozmirnostei" [Investigation efficiency decomposition algorithm joint edges for solving the problem of a large-scale traveling salesman], *Lviv Polytechnic*, No. 12(52), pp. 1-5.
12. Mitrahovych, M.M., Silkov, V.I., Samkov, A.V. and Semenov, V.B. (2016), "Bezpilotni litalni aparaty: obgruntuvannya i rozrakhunok osnovnykh parametriv i kharakterystyk" [Unmanned aerial vehicles: justification and calculation of basic parameters and characteristics], CNDI ZSU, Kyiv, 368 p.
13. Yefremov, O.V., Horbenko, V.M. and Korshets, O.A., (2018), "Metodyka otsiniuvannya efektyvnosti zastosuvannya pidrozdiliv bezpilotnykh aviatsiynykh kompleksiv" [Methodic to evaluation of the efficiency of combat application divisions of unmanned aviation complexes], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 4(58), pp. 30-36. <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.58.04>.
14. Voronyn, A.N., Zyatdynov, Yu.K., Kozlov, O.Y. and Chabaniuk, V.S. (1999), "Vektornaia optymyzatsiia dynamycheskykh system" [Vector optimization of dynamic systems], *Tehnika*, Kyiv, 284 p.
15. Cteshenko, P.M. (2016), "Matematychna model dlia otsiniuvannya efektyvnosti boiovoho zastosuvannya ozviduvalnykh bezpilotnykh aviatsiynykh kompleksiv" [A mathematical model for evaluating the effectiveness of combat deployment of reconnaissance unmanned aeronautical complexes], *Weapons and Military Equipment*, No. 2(10), pp. 25-28.
16. Vorotnikov, V.V., Humeniuk, I.V. and Pozdniakov, P.V. (2017), "Planuvannya marshrutiv polotu bezpilotnykh litalnykh aparativ shliakhom rozviazannya zadachi komivoiazhera" [Planning the flight routes of the unmanned aerial vehicle by solving the travelling salesman problem], *Technological Audit and Production Reserves*, No. 4/2(36), pp. 1-13. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.108537>.
17. Hryshchuk, R. Bondarenko, Yu. and Horbach, V. (2019), Formalized resolution of the scientific task for improving the effective planning special purpose unmanned aerial vehicles routes of tactical level, *Path of Science*, No. 5(1), pp. 1001-1007. <https://doi.org/10.22178/pos.42-1>.
18. Pavlii, V.O., Makoveichuk, O.M. and Khudov, H.V. (2013), "Pokaznyky efektyvnosti vidnovlennia defokusovanykh optyko-elektronnykh zobrazhen ta zobrazhen, shcho spotvoreni zmazom" [Performance indicators for recovering defocused optoelectronic and grease-distorted images], *Bulletin of Zhytomyr Technological University*, No. 3(66), pp. 106-112, available at: www.nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2013_3_16.
19. Huliantskyi, L.F. and Mulesa, O.Iu. (2016), "Prykladni metody kombinatornoj optyimizatsii" [Applied combinatorial optimization methods], Kyivskij universitet, Kyiv, 142 p.
20. Silkov, V.I. (2018), "Systema pidtrymky pryiniattia rishen pry operatyvni otsyntsi bezpilotnykh aviatsiynykh kompleksiv: Bezpilotni aviatsiini komplekxy "Mini (taktychni polia boiu)" [Decision support system for operational evaluation of unmanned aviation complexes: Unmanned aerial vehicles "Mini (tactical battlefields)"], CNDI OVT, Kyiv, 55 p.
21. Hrabovetskyi, B.Ye. (2010), "Metody ekspertnykh otsinok: teoriia, metodolohiia, napriamky vykorystannia" [Expert assessment methods: theory, methodology, directions of use], VNTU, Vinnitsa, 171 p.
22. Zahorka, O.M., Mosov, S.P., Sbytnyev, A.I. and Stuzhuk, P.I. (2005), "Elementy doslidzhennia skladnykh system viiskovoho pryznachennia" [Elements of the study of complex military systems], NAOU, Kyiv, 100 p.
23. Kliushnikov, I.M., Kliushnikov, I.M., Nerubatskyi, V.O. and Shalyhin, A.A. (2019), "Pidkhdid do formuvannya kryterialnogo aparatu otsinky efektyvnosti zmishanykh uhrupovan pilotovanoi ta bezpilotnoi aviatsii" [Approach to the formation of a criterion for assessing the effectiveness of mixed groups of manned and unmanned aircraft], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 4(37), pp. 50-55. <http://doi.org/10.30748/nitps.2019.37.07>.
24. Zade, L.A. (1976), "Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy" [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions], Mir, Moscow, 162 p.

25. Ishigami, H., Fukuda, T., Shibata, T. and Arai, F. (1995), Structure optimization of fuzzy neural network by genetic algorithm, *Fuzzy Sets and Systems*, No. 71, pp. 257-264.

Надійшла до редколегії 20.03.2020

Схвалена до друку 14.04.2020

Відомості про авторів:

Горбач Вадим Ярославович
ад'юнк
Житомирського військового
інституту ім. С.П. Корольова,
Житомир, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3676-5673>

Бондаренко Юрій Леонідович
кандидат технічних наук
начальник кафедри
Житомирського військового
інституту ім. С.П. Корольова,
Житомир, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0395-4275>

Information about the authors:

Vadim Gorbach
Doctoral Student
of Korolyov Zhytomyr
Military Institute,
Zhytomyr, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3676-5673>

Yuri Bondarenko
Candidate of Technical Sciences
Head of Department
of Korolyov Zhytomyr
Military Institute,
Zhytomyr, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0395-4275>

УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНА МАРШРУТА ПОЛЕТА РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОГО БПЛА I КЛАССА

В.Я. Горбач, Ю.Л. Бондаренко

В статье рассматриваются проблемные аспекты планирования маршрута полета разведывательного беспилотного комплекса I класса в условиях: наличия разведывательного задания, априорной информации о районе ведения воздушной разведки, учета тактико-технических характеристик БпЛА и целевого снаряжения. План маршрута полета БпЛА представлен как система, которая характеризуется множеством критериев эффективности. Основное внимание сосредоточено на выделении основных показателей эффективности и плана маршрута полета. Рассмотрены варианты определения обобщенного показателя, который будет отражать общую оценку плана маршрута полета БпЛА по определенным показателям. Представлены некоторые варианты поиска обобщенного показателя и выбор оптимальной схемы компромиссов для решения поставленной задачи. Выделена нелинейная схема компромиссов, как наиболее подходящая для поиска оптимального значения обобщенного показателя. Данная схема предполагает поиск обобщенного показателя эффективности по определенным нормированным показателям. Нормирование показателей эффективности плана маршрута полета БпЛА проводилось исходя из того, к какому виду относятся показатели стимуляторы или дестимуляторы. Также, предложен вариант нормирования обобщенного показателя эффективности рассчитанного по выбранной схеме и проведения оценки плана маршрута полета БпЛА I класса с использованием лингвистической шкалы. Проведенный расчет вариантов планов маршрута БпЛА по определенным показателям является наглядным и показательным с применением лингвистической шкалы оценивания. Предложенная усовершенствованная методика оценки эффективности плана маршрута полета БпЛА I класса предназначена для выбора оптимального варианта плана из множества.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, план маршрута полета, показатели планирования, критерии эффективности, нелинейная схема компромиссов, лингвистическая шкала.

IMPROVED METHODS FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE FLIGHT PLAN OF RECONNAISSANCE UAV I CLASS

V. Gorbach, Yu. Bondarenko

The article discusses the problematic aspects of planning of the flight route of class I reconnaissance UAV in terms of: availability of the reconnaissance mission, a priori information about the area of conducting aerial reconnaissance, accounting of tactical and technical characteristics of UAVs and target equipment. The UAV flight plan is presented as a system characterized by the presence of a large number of efficiency indices. The focus is on highlighting the key efficiency indices of a flight plan. It was considered a variant of the generalized index, which will reflect the overall estimation of the UAV flight plan by the particular indicators. Some options for finding a generalized index, analyzing and choosing the best compromise scheme to solve the problem are presented. There was highlighted a nonlinear scheme of compromises as the most suitable for finding the optimal value of the generalized index. This scheme involves the search of the generalized efficiency index over the defined normalized indices. The efficiency indices rate setting of the UAV flight plan was carried out on the basis of what kind of stimulators or destimulators the indices belong to. Also, it was offered the generalized efficiency index rate setting, calculated according to the selected scheme. It was carried out the estimation of class I reconnaissance UAV flight plan according to the particular efficiency indices using the linguistic scale. The calculation of the variants of the UAV route plans according to certain indicators showed the clarity and demonstrability of the use of the linguistic evaluation scale. The conducted calculation of UAV route plans options by the particular indices indicated the evidence and reliability of the application of linguistic grading scale. The diagram of the generalized rated efficiency indices of class I reconnaissance UAV flight plan for a more visual presentation of the results was cited. The introduced improved methods of estimation of the effectiveness of class I reconnaissance UAV flight plan was designed for selecting the optimal plan among the variety of available ones.

Keywords: unmanned aircraft vehicle, flight plan, planning indices, efficiency criteria, nonlinear scheme of compromises, linguistic scale.