

Ю.Л. Бондаренко, к.т.н.

С.О. Дупелич, к.т.н.

В.Я. Горбач, ад'юнкт

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова

Удосконалена математична модель планування маршрутів польоту розвідувальних безпілотних літальних апаратів класу тактичні

Наведено підхід до формування удосконаленої математичної моделі планування маршрутів польоту розвідувальних безпілотних літальних апаратів класу тактичні. В основу моделі покладено розрахунки показників ефективності планування маршруту польоту. Можливість врахування умов зовнішнього середовища та факторів впливу на безпілотний літальний апарат відрізняє цю модель від інших. Визначено, що основними критеріями ефективності планування маршрутів польоту розвідувальних безпілотних літальних апаратів класу тактичні є: ймовірність ураження безпілотного літального апарату, якість розвідувальної інформації, ймовірність виявлення об'єктів розвідки (цілей), загальний час виконання розвідувального завдання з безпілотним літальним апаратом. Доведено необхідність врахування основних показників, які визначають ефективність розвідки із застосуванням безпілотного літального апарату. Досліджено функціональні залежності таких показників, льотно-технічних характеристик літального апарату та технічних можливостей цільового навантаження.

Застосування цієї математичної моделі дає можливість вибору оптимального зразка розвідувального безпілотного літального апарату для вирішення конкретних завдань розвідки у заданому районі. Оскільки кожен зразок безпілотного літального апарату має свій набір льотно-технічних характеристик і характеристик навісного обладнання, то основним завданням при розробці такої моделі було оптимальне їх врахування за визначених погодних умов. Розрахунок показника, який визначає якість розвідувальної інформації, додатково дає можливість визначення оптимальної висоти польоту для заданих умов. Також із застосуванням моделі можна математично обґрунтувати дії особи, яка формує маршрут польоту.

Ключові слова: *безпілотні літальні апарати; критерії ефективності; планування маршруту польоту; показники ефективності.*

Постановка проблеми. Для розвідувального забезпечення виконання бойових завдань операції об'єднаних сил (ООС) застосовуються розвідувальні безпілотні літальні апарати (БПЛА) переважно тактичної ланки.

Проте їх застосування в умовах вимог та обмежень, які висуваються до розвідувальних завдань, льотно-технічні можливості БПЛА, наявність засобів ураження противника передбачає множинність варіантів маршруту польоту. Проблема, яка постає у процесі планування, полягає у виборі оптимального плану маршруту польоту. Врахування зазначених вище факторів вносить складність у прийняття обґрунтованого рішення.

Тому вироблення ефективних методів застосування розвідувальних БПЛА, подальше підвищення ефективності експлуатації діючих зразків БПЛА є актуальним завданням. Зокрема, потребують дослідження критерії ефективності планування маршруту польоту та фактори впливу на розвідувальні БПЛА тактичної ланки.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень та публікацій [2–9] показав, що підвищення ефективності повітряної розвідки з БПЛА тактичної ланки є достатньо поширеною науковою проблематикою, яку розглядає ряд вітчизняних та зарубіжних науковців.

Як доводить досвід практичного застосування БПЛА [1, 4, 8], зазначені вище фактори можуть суперечити один одному, створюючи невизначеність при наданні пріоритету будь-якому з них під час планування.

В [1] не враховано факторів впливу зовнішнього середовища, які, у свою чергу вносять зміни у вихідний результат планування. Проте із аналізу доступних джерел [10–15] встановлено, що в більшості з них не наводяться адекватні моделі вибору маршруту польоту розвідувальних БПЛА тактичної ланки. Наведені фактори впливу враховуються із високим ступенем суб'єктивізму особи, яка планує маршрут польоту.

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

Формулювання завдання дослідження. Метою даної роботи є удосконалення математичної моделі планування маршрутів польоту розвідувальних БПЛА тактичної ланки, обґрунтування критеріїв ефективності планування маршрутів польоту.

Викладення основного матеріалу. У працях [2–5, 7, 8, 15] розглядаються математичні моделі, які мають за мету підвищення ефективності розвідки з БпЛА шляхом визначення оптимального маршруту польоту за допомогою розрахунку ймовірності виконання завдань розвідки після завершення завдання. Проте досвід застосування БпЛА в ООС на сході України свідчить про необхідність врахування факторів, які впливають на ефективність розвідувальних операцій з БпЛА до вильоту ЛА. Необхідно брати до уваги загрози та обмеження природного та технічного характеру [6, 17], які суттєво впливають на кінцевий результат польотного завдання.

Критерії ефективності планування маршруту польоту розвідувального БпЛА тактичної ланки обумовлюються [2, 3, 13, 16]: завданням вищого штабу; можливостями противника щодо зриву розвідувального завдання; часовими параметрами планування та (або) виконання місії; параметрами, які визначають технічні можливості БпЛА.

У такому разі план маршруту польоту можна зобразити у вигляді функціональної залежності:

$$P = F(K_1, K_2, \dots, K_n), \quad K_i \in \Omega, \quad i \in [\overline{1, n}], \quad (1)$$

$$K_i = f(k_1, k_2, \dots, k_w), \quad w \in [\overline{1, m}], \quad (2)$$

де P – вихідна змінна (варіант плану маршруту польоту БпЛА), яка виражається набором критеріїв, що впливають на кінцевий результат плану; K_i – критерій ефективності планування маршруту польоту; n – кількість основних критеріїв ефективності планування; Ω – область можливих значень критеріїв планування маршруту польоту БпЛА, обмежена умовами перебігу розвідувального завдання з БпЛА; k_1, k_2, \dots, k_w – набір показників, які відображають математичну інтерпретацію факторів впливу на політ БпЛА; w – кількість показників (параметрів), які характеризують критерій ефективності планування.

Під час визначення зазначених показників і критеріїв потрібно дотримувалися вимог, за яких виконується залежність від вхідних умов та важливості того чи іншого критерію. На практиці, частіше всього використовується узагальнений критерій, у склад якого входять часткові критерії з визначеними ваговими коефіцієнтами. При удосконаленні математичної моделі, яка визначатиме ефективність планування маршруту польоту розвідувального БпЛА тактичної ланки, доцільно застосувати підхід [8]. Він дозволяє розглядати вирішення даного завдання як багатоетапний процес, який враховує:

- тактичні показники та критерії, які висуваються у вигляді спеціальних завдань (можлива кількість об'єктів розвідки (ОР), якість розвідувальної інформації, ймовірність кількості розвіданих об'єктів);
- показники та критерії, які відображають технічні можливості комплексу щодо виконання спеціальних завдань (ймовірність ураження БпЛА, загальний час польоту, показники, які відображають можливості спеціальної апаратури розвідки);
- умови проведення розвідувального польоту.

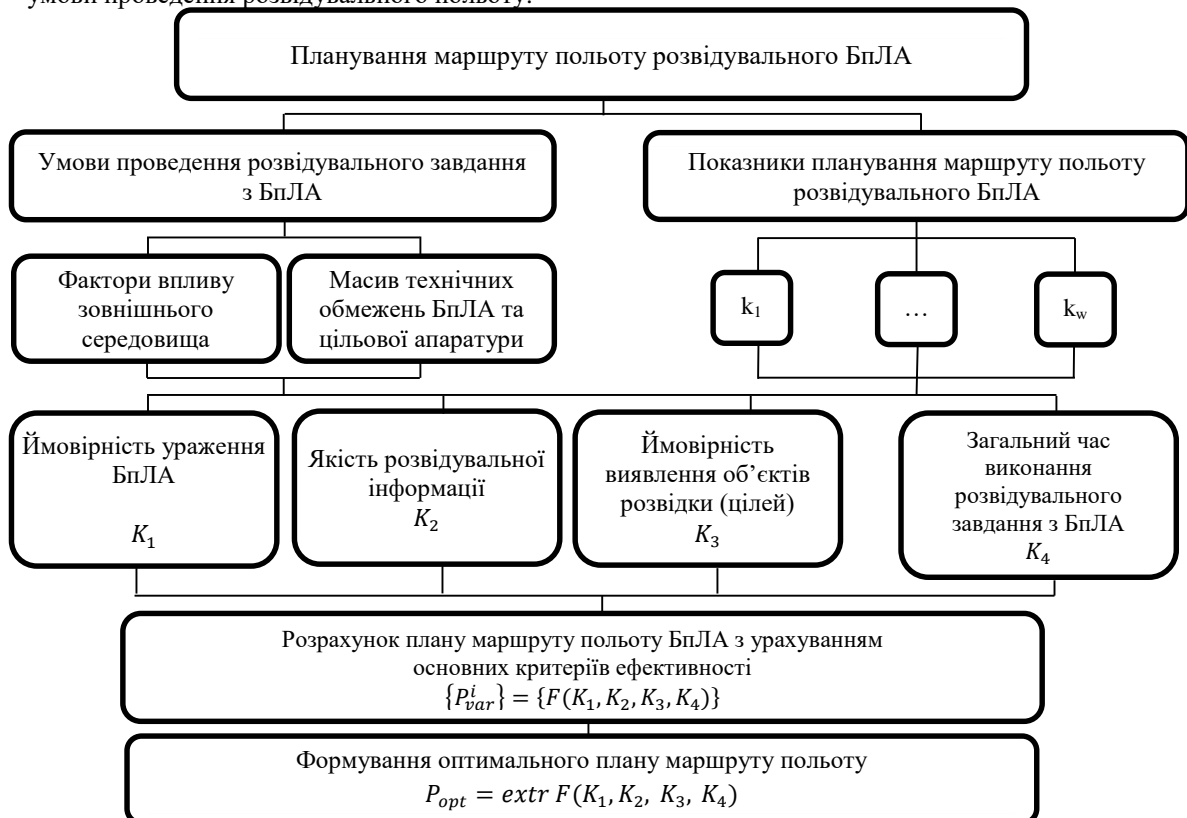


Рис. 1. Схема умов, критеріїв та показників, які впливають на ефективність планування маршруту польоту БпЛА тактичної ланки

Умови, в яких БпЛА виконуватиме завдання розвідки, критерії та показники, які впливають на ефективність планування маршруту польоту БпЛА, можна зобразити у вигляді схеми (рис. 1).

Формування моделі планування маршрутів польоту за умови впливу на розвідувальні БпЛА тактичної ланки полягає в зведенні (агрегації) переліку суперечливих критеріїв у певну послідовність щодо їх важливості та величини впливу на вибір оптимального маршруту польоту БпЛА. Максимізація задоволення вимог завдання щодо своєчасності, прогнозованої достовірності отримання результатів, мінімальна ймовірність втрати БпЛА у зв'язку із їх високою вартістю – головні вимоги планування маршруту польоту. У зв'язку із великою кількістю складових та систем розвідувальних БпЛА тактичної ланки приймемо, що надійність їх функціонування у польоті максимальна, тобто ймовірність відмови комплексу сумарна $P_{\text{відм}}^{\text{сум}} \approx 0$. Це спрощення моделі має місце у зв'язку із обов'язковістю передполітної підготовки ЛА, яка мінімізує вплив цього фактора. Виходячи із специфіки завдань розвідки з БпЛА тактичної ланки, факторів впливу зовнішнього середовища, технічних можливостей БпЛА приймемо за критерії ефективності планування маршруту польоту основні вимоги до завдань аеророзвідки. До них належать: ймовірність ураження БпЛА – K_1 , якість розвідувальної інформації – K_2 , ймовірність виявлення ОР (цілей) – K_3 , загальний час виконання розвідувального завдання з БпЛА – K_4 .

Ймовірність ураження БпЛА – критерій, який характеризує процес виконання розвідувального завдання БпЛА та дає можливість оцінювати ризики втрати ЛА. Виходячи з [1, 4, 8] його можна представити у вигляді умовної ймовірності, що дорівнює добутку ймовірності пошуку засобами протиповітряної оборони (ППО) противника та умовної ймовірності ураження БпЛА ППО противника врахованої за умови, що БпЛА було виявлено:

$$P_{\text{ураж}}^{\text{БпЛА}} = P_{\text{вияв}}^{\text{ППО}} (P_{\text{ураж/вияв}}^{\text{ППО}}), \quad (3)$$

де $P_{\text{вияв}}^{\text{ППО}}$ – пошук засобами ППО противника; $P_{\text{ураж}}^{\text{ППО}}$ – ураження засобами ППО противника за умови виявлення БпЛА.

Вираз для обчислення ймовірності пошуку засобами ППО $P_{\text{вияв}}^{\text{ППО}}$ матиме такий вигляд [11]:

$$P_{\text{вияв}}^{\text{ППО}} = 1 - e^{-\gamma \tau_{\text{пош}}^{\text{ППО}}}, \quad (4)$$

де γ – інтенсивність потоку виявлень, тобто середнє число виявлених БпЛА за одиницю часу; $\tau_{\text{пош}}^{\text{ППО}}$ – час пошуку БпЛА засобом ППО.

Ймовірність ураження засобами ППО противника $P_{\text{ураж}}^{\text{ППО}}$, за умови, що їх може бути декілька, визначають таким виразом [8]:

$$P_{\text{ураж}}^{\text{ППО}} = \prod_{i=1}^q p_{(i/i-1)}, \quad (5)$$

де $p_{(i/i-1)}$ – ймовірність ураження засобом ППО противника за умови неуразження попереднім засобом; q – кількість засобів ППО на маршруті польоту БпЛА.

$$K_1 = P_{\text{ураж}}^{\text{БпЛА}} \rightarrow \min.$$

Якість розвідувальної інформації – критерій, який відображає ймовірнісну величину розвідувальної інформації, яка залежить від заданої чи необхідної роздільної здатності фото- та відеоінформації та оптимальної висоти повітряної зйомки. Розрахунок доцільно виконувати, використовуючи удосконалену формулу Живичина [14], яка враховуватиме задану детальність d_0 знімка, роздільну здатність цільової апаратури фото-, відеофіксації d та радіометричний контраст ОР Q . Цей критерій $P_{\text{розп}}^{\text{ОР}}$ виразимо у вигляді функціональної залежності відповідних показників [15], які можуть змінюватися залежно від розвідувального завдання чи зразка БпЛА:

$$P_{\text{розп}}^{\text{ОР}} = \exp \left[\frac{\ln \rho}{\log_{1-Q}} \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 \right], \quad (6)$$

де ρ – рівень достовірності, зазвичай $\rho = 0,95$; Q - радіометричний контраст, який розраховується [14] та для спрощення обчислень прийматимемо його значення в межах $Q = 0,75 - 0,85$; $d = \frac{hc_0}{f_k}$ – роздільна здатність цільового спорядження; c_0 – розмір пікселя; f_k – фокусна відстань оптичної системи; h – висота ведення розвідки з БпЛА.

$$K_2 = P_{\text{розп}}^{\text{ОР}} \rightarrow \max.$$

Ймовірність виявлення ОР $P_{\text{вияв}}^{\text{ОР}}$ – критерій, який дає можливість особі, що здійснює планування застосування БпЛА, оцінювати ефективність розвідки, оперуючи даними про БпЛА та типові ОР противника. Мається на увазі оперативні та тактичні нормативи підрозділів збройних сил противника щодо площі їх розміщення на місцевості.

$$P_{\text{вияв}}^{\text{ОР}} = 1 - e^{-\frac{H_{\text{см}} L_{\text{пол}} S_{\text{розв}}}{S_{\text{заг}}}}, \quad (7)$$

де $S_{\text{розв}}$ – площа смуги розвідки БпЛА; $S_{\text{заг}}$ – загальна площа району цілей (ОР), що підлягають розвідці.

Площу смуги розвідки можна визначити за відомим шляхом $L_{\text{пол}}$, шириною смуги розвідки $H_{\text{см}}$, середньою швидкістю польоту $V_{\text{сер}}$

$$S_{\text{розв}} = L_{\text{пол}} 2h \tan \frac{\varphi}{2}, \quad (8)$$

де $L_{\text{пол}} = V_{\text{сер}} T_{\text{розв}}$ – шлях пройдений БпЛА по маршруту польоту; $H_{\text{см}} = 2h \tan \frac{\varphi}{2}$ – ширина смуги розвідки; $V_{\text{сер}}$ – середня швидкість польоту БпЛА по визначеному маршруту.

Тоді вираз матиме такий вигляд:

$$P_{\text{вияв}}^{\text{ОР}} = 1 - e^{-\frac{2h \tan \frac{\varphi}{2} V_{\text{сер}} T_{\text{розв}}}{S_{\text{заг}}}}, \quad (9)$$

$$K_3 = P_{\text{вияв}}^{\text{ОР}} \rightarrow \max.$$

Загальний час виконання розвідувального завдання з БпЛА $T_{\text{заг}}$ – критерій, який характеризує можливості БпЛА щодо загальної протяжності маршруту польоту у заданих умовах [8]. При цьому для розрахунку відстані необхідно дотримуватися врахування середньої оптимальної швидкості польоту ЛА.

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{пл}} + T_{\text{пол}} + T_{\text{розв}}, \quad (10)$$

$$K_4 = T_{\text{заг}} \rightarrow \min,$$

де $T_{\text{пл}}$ – час виконання заходів планування маршруту польоту БпЛА; $T_{\text{пол}}$ – час польоту від моменту зльоту до першого ОР та від останнього ОР до посадки ЛА; $T_{\text{розв}}$ – час польоту від першого до останнього ОР без польоту та повернення; $T_{\text{заг}}$ – час виконання заходів від моменту отримання завдання до завершення польоту БпЛА.

Виходячи зі сформованих основних критеріїв ефективності планування маршруту польоту розвідувальних БпЛА тактичної ланки, показники ефективності планування можна представити у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Показники ефективності планування маршруту польоту з БпЛА

№ з/п	Умовне позначення		Найменування показника	Одиниця вимірювання	Належність
1	k_1	γ	Інтенсивність потоку виявлень, тобто середнє число виявлених БпЛА за одиницю часу	шт./год	K_1
2	k_2	$\tau_{\text{пош}}^{\text{ППО}}$	Час пошуку БпЛА засобом ППО	год	K_1
3	k_3	p_i	Ймовірність ураження засобом ППО противника	%	K_1
4	k_4	q	Кількість засобів ППО на маршруті польоту БпЛА	шт.	K_1
5	k_5	φ	Миттєвий кут поля зору камери	рад.	K_2, K_4
6	k_6	d_0	Задана детальність знімку	м	K_2
7	k_7	d	Роздільна здатність цільового спорядження	м	K_2
8	k_8	c_0	Розмір пікселя	м	K_2, K_3
9	k_9	h	Висота ведення розвідки	м	K_2, K_4
10	k_{10}	f_k	Фокусна відстань оптичної системи	м	K_2, K_3
11	k_{11}	$T_{\text{заг}}$	Час виконання заходів від моменту отримання завдання до завершення польоту БпЛА	год	K_3
12	k_{12}	$T_{\text{пл}}$	Час виконання заходів планування маршруту польоту БпЛА;	год	K_3
13	k_{13}	$T_{\text{пол}}$	Час польоту від моменту зльоту до першого ОР та від останнього ОР до посадки ЛА	год	K_3
14	k_{14}	$T_{\text{розв}}$	Час польоту від першого до останнього ОР	год	K_3, K_4
15	k_{15}	$S_{\text{розв}}$	Площа смуги розвідки БпЛА	м ²	K_4
16	k_{16}	$S_{\text{заг}}$	Загальна площа району розвідки (бойових порядків противника)	м ²	K_4
17	k_{17}	$L_{\text{пол}}$	Шлях, пройдений БпЛА, по маршруту польоту	м	K_4
18	k_{18}	$H_{\text{см}}$	Ширина смуги розвідки.	м	K_4
19	k_{19}	$V_{\text{сер}}$	Середня швидкість польоту БпЛА по визначеному маршруту	км/год	K_4

Проведення розвідки з БпЛА тактичної ланки передбачає [1] врахування факторів впливу зовнішнього середовища, обмежень льотно-технічними можливостями БпЛА та апаратури відеоспостереження, що наведені в таблицях 2–4.

Таблиця 2

Основні фактори впливу зовнішнього середовища

№ з/п	Умовне позначення	Назва фактора	Одиниця вимірювання	Вплив на критерій
1	$V_{\text{вітр}}$	Швидкість вітру	км/год	K_1, K_2, K_3, K_4
2	$t_{\text{пов}}$	Температура повітря	°С	K_1, K_2, K_3
3	χ	Відносна вологість повітря	%	K_1

Таблиця 3

Основні льотно-технічні характеристики БпЛА

№ з/п	Умовне позначення	Бал параметру	Характеристика	Одиниця вимірювання	Вплив на критерій
1	T_{max}	9	Максимальна тривалість польоту	год	K_3
2	$L_{\text{пол}}^{\text{max}}$	9	Максимальна дальність польоту	км	K_1, K_3, K_4
3	R_b	8	Бойовий радіус дії	км	K_1, K_3, K_4
4	V_{max}	6	Максимальна швидкість	км/год	K_1, K_3, K_4
5	$h_{\text{ст}}$	6	Статична стеля	м	K_1
6	V_{min}	4	Мінімальна швидкість	км/год	K_1, K_3, K_4

Таблиця 4

Основні технічні характеристики апаратури відеоспостереження БпЛА

№ з/п	Умовне позначення	Бал параметра	Характеристика	Одиниця вимірювання	Вплив на критерій
1	$d_{\text{зн}}^{\text{min}}$	9	Мінімальна, роздільна здатність	м×град.	K_2
2	$\epsilon_{\text{ст}}$	8	Точність стабілізації	м×град.	K_2
3	$z_{\text{опт}}$	6	Оптичний зум	од.	K_1, K_2
4	$\varphi_{\text{max}}^{\text{аз}}$	5	Максимальний кут зору по азимуту	град.	K_2, K_4
5	$\varphi_{\text{max}}^{\text{км}}$	5	Максимальний кут зору по куту місця	град.	K_2, K_4

Представлена вище модель задачі (2)–(10) є моделлю багатокритеріальної оптимізації основних критеріїв планування маршрутів польоту розвідувальних БпЛА тактичної ланки літакового типу, яка дає можливість оптимізувати показники ефективності планування маршрутів польоту БпЛА. Моделювання конкретної обстановки із заданими факторами впливу на БпЛА показало, що критерії ефективності планування зі зміною часу розвідки, висоти спостереження, можливостей цільової апаратури, характеру ОР тощо. мають не однонаправлену екстремізацію рис. (2, 3).

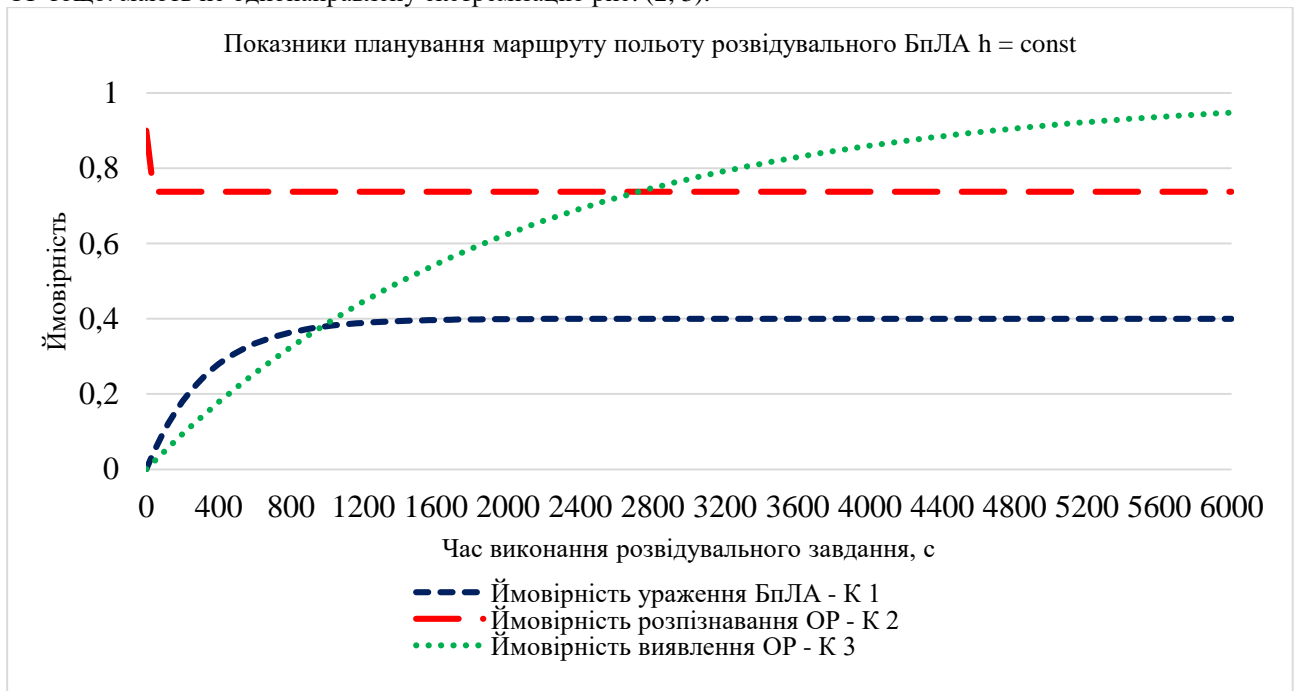


Рис. 2. Показники ефективності планування маршруту польоту

розвідувального БпЛА при $h = const$

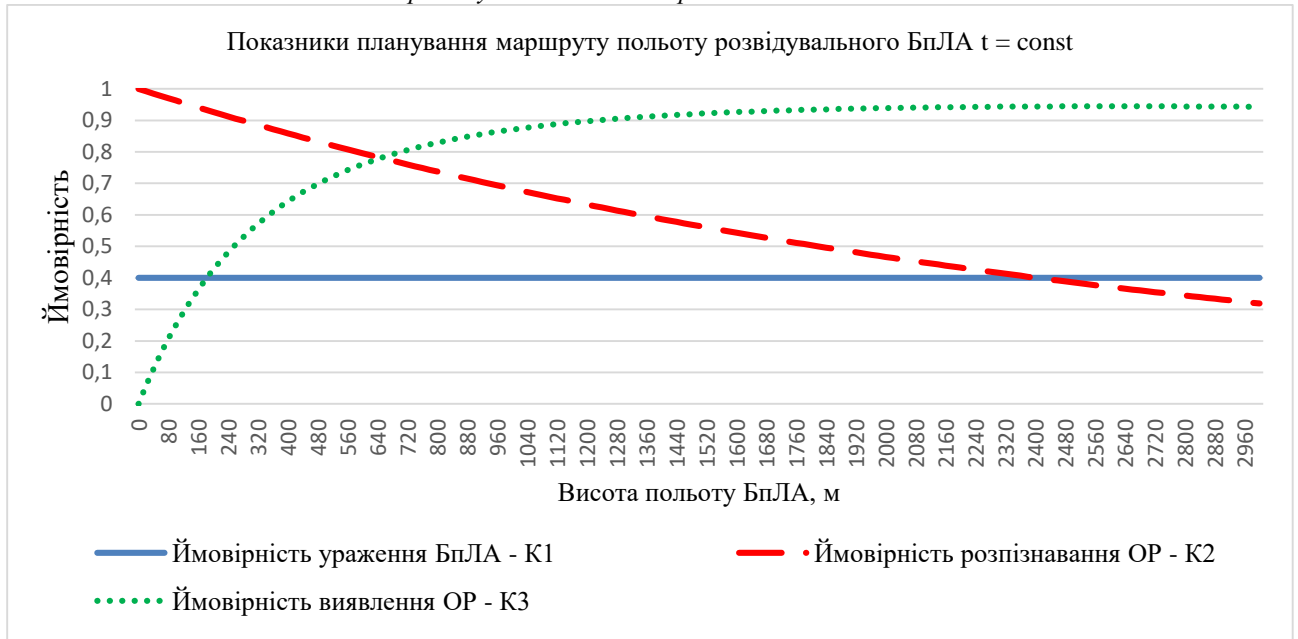


Рис. 3. Показники ефективності планування маршруту польоту розвідувального БпЛА при $t = const$

Безумовно, при розв'язуванні задачі для конкретного зразка БпЛА частина змінних показників та параметрів може змінюватися, а також можуть коригуватися додаткові умови щодо розвідувального завдання. Запропонована математична модель, що зображена на рисунку 3, дозволяє оптимізувати процес планування маршрутів польоту (знаходити оптимальний маршрут польоту) розвідувального БпЛА класу тактичний літакового типу із можливих варіантів з урахуванням умов зовнішнього впливу.

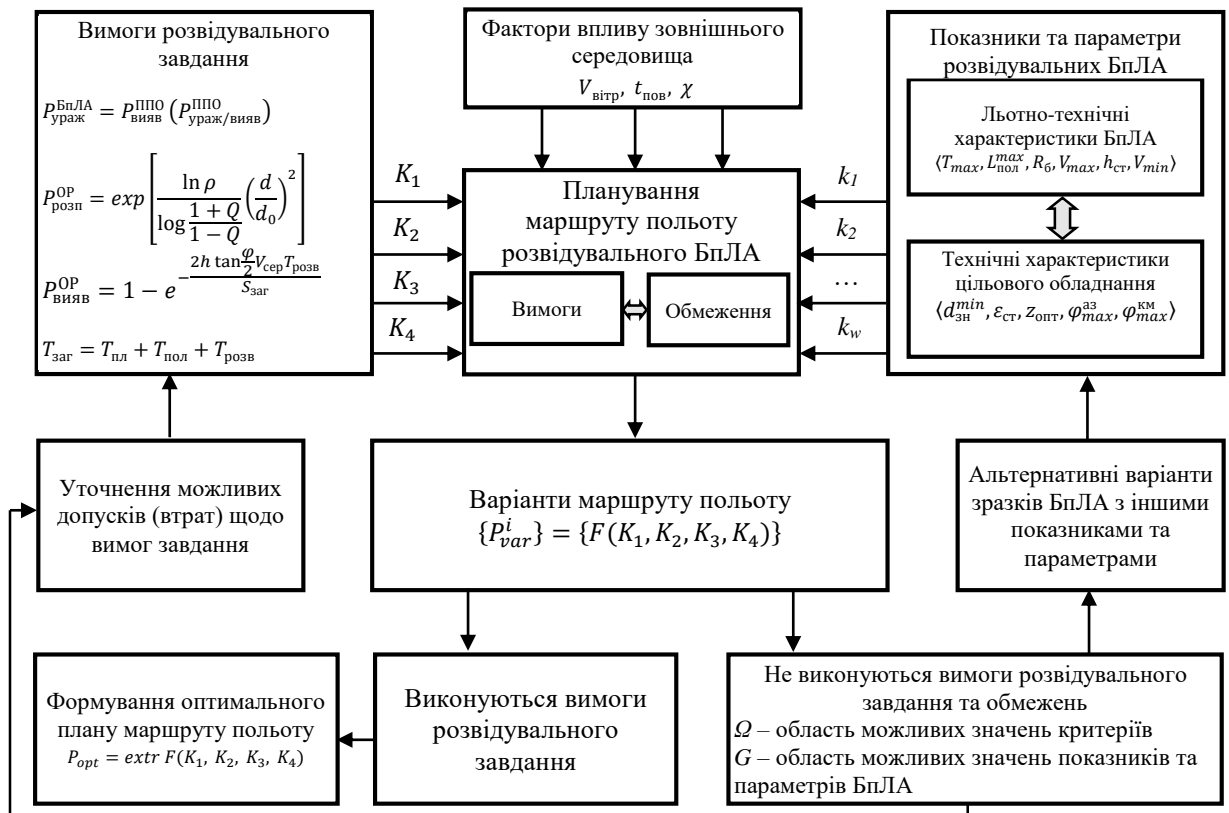


Рис. 4. Удосконалена математична модель планування маршрутів польоту розвідувальних БпЛА тактичної ланки

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблено математичну модель, яка відрізняється від існуючих:

- врахуванням вимог розвідувального завдання та умов протидії противника;
- використанням математичного апарату для планування маршруту польоту розвідувального БПЛА тактичної ланки з урахуванням основних факторів впливу зовнішнього середовища;
- оперативно визначати числові значення основних критеріїв планування маршруту польоту розвідувальних БПЛА тактичної ланки;
- визначати можливість застосування конкретного зразка БПЛА для виконання розвідувального завдання.

Вперше формалізовано завдання планування маршруту польоту, що дозволяє: підвищувати ефективність планування маршрутів польоту за основними критеріями планування, покращувати показники живучості БПЛА та обґрунтовувати суб'єктивні судження особи, яка здійснює планування маршрутів польоту розвідувальних БПЛА тактичного класу. Планувати маршрут польоту з урахуванням критеріїв ефективності планування, основних змінних та фіксованих параметрів БПЛА.

Список використаної літератури:

1. Система підтримки прийняття рішень при оперативній оцінці безпілотних авіаційних комплексів // Безпілотні авіаційні комплекси «Міні (тактичні поля бою)». – К. : ЦНДІ ЗСУ, 2018. – Вип. 2. – 55 с.
2. *Kakar A.* UAV Communications: Spectral Requirements, MAV and SUAV Channel Modeling, OFDM Waveform Parameters, Performance and Spectrum Management : Thesis / *A.Kakar.* – 2015. – 110 p.
3. Вибір показників і критеріїв для оцінки ефективності повітряної розвідки щодо виявлення незаконних збройних формувань / *В.П. Городнов, Е.Б. Смірнов, А.В. Трістан, О.Е. Чернавина* // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2012. – № 1(7). – С. 58–62.
4. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: ground control quality, quantity and bundle adjustment. / *R.Michael, S.Robson, d'O.-Oltmanns, S. Niethammer, U.* // *Geomorphology.* – 2017. – Vol. 280. – P. 51–66.
5. Survey of Channel Modeling for UAV Communications / *A.Khuwaja, Y.Chen, N.Zhao, M.-S. Alouini* // Draft. – 2018. – P. 1–34 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://arxiv.org/pdf/1801.07359.pdf>.
6. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов : справ. пособие / *А.Г. Гребенников, А.К. Мяслица, В.В. Парфенюк и др.* – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиаци. ин-т», 2008. – 377 с.
7. An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaics to Survey Archaeological Areas. / *F.-J. M.-Carrascosa, M. Garcia, J. de Larriva, A. G.-Ferrer.* – Published online 2016, Nov. 1. – Doi : 10.3390/s16111838.
8. *Gallagher A.* Surveillance UAV : Thesis / *A.Gallagher.* – 2015. – 109 p.
9. *Ростопчин В.В.* Элементарные основы оценки эффективности применения беспилотных авиационных систем для воздушной разведки / *В.В. Ростопчин* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.uav.ru/articles/basic_uav_efficiency.pdf.
10. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / *Т.Саати.* – М. : Радио и связь, 1993. – 226 с.
11. *Корочкин А.А.* Оценка эффективности поиска разведывательными авиационными комплексами / *А.А. Корочкин.* – Х. : ХВВАИУ, 1986. – 120 с.
12. *Ерёмин Г.В.* Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО / *Г.В. Ерёмин, А.Д. Гаврилов, И.И. Назарчук.* – 2015 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/>.
13. *Рэндал У.* Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / *Рэндал У. Биард, Тимоти У. Мак Лэйн.* – М. : Техносфера, 2015. – 312 с.
14. *Bit-Monnot A.* Local Search Approach to Observation Planning with Multiple UAVs / *Bit-Monnot, R.B.-Ruiz, S.Lacroix* // International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS). – Delft, Netherlands, 2018. – 9 p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01730655>.
15. *Стешенко П.М.* Математична модель для оцінювання ефективності бойового застосування розвідувальних безпілотних авіаційних комплексів / *П.М. Стешенко* // Озброєння та військова техніка. – К. : Державний науково-дослідний інститут авіації. – 2016. – № 2 (10). – С. 25–28.
16. *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 ЖДТУ / Серія : Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2013. – № 3 (66). – С. 106–112.
17. *Watts A.C.* Unmanned Aircraft Systems for Wildland Fire Monitoring and Research / *A.C. Watts, L.N. Kobziar, H.F. Percival* // In Proceedings of the 24th Tall Timbers Fire Ecology Conference: The Future of Fire: Public Awareness, Health, and Safety. – Tallahassee, FL, USA. – 11–15 January 2009. – P. 86–90.

References:

1. «Systema pidtrymky pryjnjattja rishen' pry operatyvnij ocinci bezpilotnyh aviacijnyh kompleksiv» (2018), *Bezpilomi aviacijni kompleksi «Mini (taktychni polja boju)»*, CNDI ZSU, K., Issue 2, 55 p.

2. Kakar, A. (2015), «UAV Communications: Spectral Requirements, MAV and SUAV Channel Modeling, OFDM Waveform Parameters, Performance and Spectrum Management», Dissertation, 110 p.
3. Gorodnov, V.P., Smirnov, E.B., Tristan, A.V. and Chernavina, O.E. (2012), «Vybir pokaznykiv i kryterii'v dlja ocinky efektyvnosti povitranoi' rozvidky shhodo vyjavlennja nezakonnih zbrojnih formuvan'», *Nauka i tehnika Povitranjnyh Syl Zbrojnyh Syl Ukrainy*, No. 1 (7), pp. 58–62.
4. Michael, R., Robson, S., Oltmanns, d'O. and Niethammer, S.U. (2017), «Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: ground control quality, quantity and bundle adjustment», *Geomorphology*, Vol. 280, pp. 51–66.
5. Khuwaja, A., Chen, Y., Zhao, N. and Alouini, M.-S. (2018), «Survey of Channel Modeling for UAV Communications», *Draft*, pp. 1–34, [Online], available at: <https://arxiv.org/pdf/1801.07359.pdf>
6. Grebennikov, A.G., Myalitsa, A.K., Parfenyuk, V.V. and other (2008), *Obshchie vidy i kharakteristiki bespilotnykh letatel'nykh apparatov, sprav. posobie*, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», Kh., 377 p.
7. M.-Carrascosa, F.-J., García, M., Larriva, J. de and G.-Ferrer, A. (2016), *An Analysis of the Influence of Flight Parameters in the Generation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Orthomosaics to Survey Archaeological Areas*, [Online], Doi : 10.3390/s16111838.
8. Gallagher, A. (2015), «Surveillance UAV», Dissertation, 109 p.
9. Rostopchin, V.V. *Elementarnye osnovy otsenki effektivnosti primeneniya bespilotnykh aviatsionnykh sistem dlya vozdushnoi razvedki*, [Online], available at: http://www.uav.ru/articles/basic_uav_efficiency.pdf
10. Saati, T. (1993), *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii*, Radio i svyaz', M., 226 p.
11. Korochkin, A.A. (1986), *Otsenka effektivnosti poiska razvedyvatel'nymi aviatsionnymi kompleksami*, KhVVAIU, Kh., 120 p.
12. Eremin, G.V., Gavrilov, A.D. and Nazarchuk, I.I. (2015), *Malorazmernye bespilotniki – novaya problema dlya PVO*, [Online], available at: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/>
13. Biard, Rendal U. and Mak Lein, Timoti U. (2015), *Malye bespilotnye letatel'nye apparaty: teoriya i praktika*, Tekhnosfera, M., 312 p.
14. Bit-Monnot, B.-Ruiz, R. and Lacroix, S. (2018), «A Local Search Approach to Observation Planning with Multiple UAVs», *International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*, Delft, Netherlands, 9 p., [Online], available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01730655>.
15. Steshenko, P.M. (2016), «Matematychna model' dlja ocinjuvannja efektyvnosti bojovogo zastosuvannja rozvidoval'nyh bezpilotnyh aviacijnyh kompleksiv», *Ozbrojennja ta vijs'kova tehnika*, Derzhavnyj naukovo-doslidnij instytut aviacii', K., No. 2 (10), pp. 25–28.
16. Pavlij, V.O., Makovejchuk, O.M. and Hudov, G.V. (2013), «Pokaznyky efektyvnosti vidnovlennja defokusovanyh optyko-elektronnyh zobrazen' ta zobrazen', shho spotvoreni zmazom», *Visnyk ZhDTU, Serija Tehnichni nauky, ZhDTU, Zhytomyr*, No. 3 (66), pp. 106–112.
17. Watts, A.C., Kobziar, L.N. and Percival, H.F. (2009), «Unmanned Aircraft Systems for Wildland Fire Monitoring and Research», *In Proceedings of the 24th Tall Timbers Fire Ecology Conference: The Future of Fire: Public Awareness, Health, and Safety*, Tallahassee, FL, USA, 11–15 January, pp. 86–90.

Бондаренко Юрій Леонідович – кандидат технічних наук, начальник кафедри тактики та бойового забезпечення Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- безпілотні літальні апарати;
- управління в складних технічних системах;
- задачі багатокритеріальної оптимізації.

Тел.: (097) 489–26–59.

Дупелич Сергій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектронної розвідки Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- безпілотні літальні апарати;
- управління в складних технічних системах;
- задачі багатокритеріальної оптимізації.

Тел.: (067) 803–66–90.

Горбач Вадим Ярославович – ад'юнкт науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- безпілотні літальні апарати;
- управління в складних технічних системах;
- задачі багатокритеріальної оптимізації.

Тел.: (067)734–28–03.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2019.