

**УДК 528.29**

**ТЕХНОЛОГІЯ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕСУРСНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ЗАСТОСУВАННЯ ТАКТИЧНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ  
АПАРАТІВ ОРГАНУ ОХОРОНИ ДЕРЖАВНОГО КОРДОНУ**

**доктор технічних наук, професор, Катеринчук І. С.**

**кандидат технічних наук, доцент, Балицький І. І.**

**кандидат технічних наук, Шпорт М. М.**

Національна академія Державної прикордонної служби України імені  
Богдана Хмельницького, м. Хмельницький

*Розроблено інформаційну технологію оцінки ресурсних параметрів застосування безпілотних літальних апаратів у складі безпілотних авіаційних комплексі Держприкордонслужби України для моніторингу обстановки на державному кордоні. Технологія надає можливості визначення оптимальних (раціональних) значень дальності, висоти та тривалості застосування БПЛА. Пошук оптимальних значень окремих критеріїв висоти, радіусу та тривалості застосування БПЛА здійснено з використанням невизначених множників Лагранжа для розв'язання рівняння балансу параметрів. Розраховані оптимальні (раціональні) значення використовуються для визначення корисного бортового навантаження БПЛА, при якому досягатиметься найкраща ефективність контролю державного кордону та максимальна відстань радіолінії керування.*

*Ключові слова: баланс, безпілотний авіаційний апарат, висота, дальність, державний кордон, ефективність, контроль, корисне навантаження, параметр, радіолінія.*

*доктор технических наук, профессор, Катеринчук И. С.,  
кандидат технических наук, доцент, Балицкий И. И., кандидат*

*технических наук, Шпорт Н. Н. Технология обоснования ресурсных параметров применения тактических беспилотных летательных аппаратов органа охраны государственной границы / Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого., г. Хмельницкий.*

*Разработана информационная технология оценки ресурсных параметров применения беспилотных летательных аппаратов в составе беспилотных авиационных комплексов Госпогранслужбы Украины для мониторинга обстановки на государственной границе. Технология предоставляет возможности определения оптимальных (рациональных) значений дальности, высоты и длительности применения БПЛА. Поиск оптимальных значений отдельных критериев высоты, радиуса и продолжительности применения БПЛА осуществлено с использованием неопределенных множителей Лагранжа для решения уравнения баланса параметров. Рассчитаны оптимальные (рациональные) значения используются для определения полезной бортовой нагрузки БПЛА, при которой достигается наилучшая эффективность контроля государственной границы и максимальное расстояние радиолинии управления.*

*Ключевые слова: баланс, беспилотный авиационный аппарат, высота, дальность, государственную границу, эффективность, контроль, полезная нагрузка, параметр, радиолиния.*

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Katerynychuk I. S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Balytskyi I. I., Candidate of Technical Sciences, Shport N. N. Technology of resource parameters substantiation of using tactical unmanned aerial vehicles of the state border guard authority / National Academy of the State Border*

*Guard Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytskyi, Khmelnytskyi.*

*The information technology of estimating resource parameters of the use of unmanned aerial vehicles in the unmanned aviation complex of the State Border Guard Service of Ukraine for monitoring the situation on the state border has been developed. The technology provides the ability to determine the optimal (rational) values of the range, height and duration of the UAV. The search for optimal values for individual criteria for altitude, radius and duration of UAVs has been carried out using indeterminate Lagrange multipliers to solve the equation of balance of parameters. The calculated (rational) values are used to determine the UAV working load, to achieve the most effective control of the state border and the maximum distance of the control radio link.*

*Keywords: balance, unmanned aerial vehicle, height, range, state border, effectiveness, control, working load, parameter, radio link.*

**Вступ.** Відповідно до Концепції та Програми розвитку Державної прикордонної служби України на період до 2020 року системі охорони державного кордону важливе значення відведено розвитку та запровадженні нових технологій моніторингу обстановки засобами радіолокаційного, телевізійного та оптико-електронного спостереження, у тому числі тих, що базуються на безпілотних літальних апаратах (БПЛА). Повнота, точність та оперативність надання достовірної інформації при використанні БПЛА при виконанні спеціальних завдань залежить від ефективності та надійності функціонування системи управління та передачі даних між елементами безпілотних авіаційних комплексів (БАК).

Повітряний моніторинг державного кордону та контрольованих прикордонних районів за допомогою БПЛА здійснюється за допомогою вітчизняних безпілотних авіаційних комплексів БПАК-МП-1

"Spectator-M", які оснащені цифровими захищеними каналами зв'язку та модернізованим моніторинговим обладнанням. Режими керування БПЛА можуть бути автоматичний, напівавтоматичний та ручний.

Загальна постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями. Дослідження проводилось відповідно до пріоритетних напрямків Концепції Державної цільової правоохоронної програми "Облаштування та реконструкція державного кордону на період до 2020 року", Концепції інтегрованого управління кордонами, Стратегії розвитку Державної прикордонної служби та планів наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності Адміністрації Держприкордонслужби України і Національної академії Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького (НАДПСУ). Базовою науково-дослідною роботою, відповідно до якої проводилося дослідження, є «Удосконалення системи оптико-електронного спостереження охорони державного кордону» (НАДПСУ, шифр 216-0168 I).

Актуальність теми дослідження обумовлена потребою усунення невідповідності між необхідністю забезпечення високої ефективності оперативно-службової діяльності підрозділів охорони кордону шляхом впровадження сучасних технічних засобів охорони кордону і відсутністю науково-методичного апарату структурної і функціональної оптимізації застосування безпілотних авіаційних комплексів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми. Завдання щодо обґрунтування раціональних параметрів, технічних характеристик та інших властивостей БАК для виконання спеціальних завдань, раціонального та безпечного їх застосування досліджували такі науковці як Даник Ю. Г., В. М. Ілюшко М., Митрахович М. М., Кусаїнов А. А. та інші [1-3].

Дослідження проблем застосування інженерно-технічних систем та комплексів в інтересах охорони державного кордону здійснено у працях [4-7].

Аналіз праць зазначених авторів вказує на необхідність проведення досліджень з питань обґрунтування вимог до технічних характеристик та оцінки ефективності застосування БАК при виконанні спеціальних завдань з охорони державного кордону. Для виконання таких завдань найбільш ефективними є малі БПЛА (злітна маса до 20 кг). У такому разі, враховуючи обмеження за габаритами і масою корисного навантаження, вважається за доцільне використання як єдиного радіоканалу зв'язку для передачі командно-телеметричних даних і даних корисного навантаження, так і окремих каналів. Використання декількох каналів зв'язку підвищує надійність системи передачі даних і в той же час є надлишковим з точки зору ефективного використання радіочастотного спектру.

Метою статті є розроблення технології визначення оптимальних (раціональних) ресурсних параметрів застосування БПЛА у складі безпілотних авіаційних комплексів Держприкордонслужби України.

Виклад основного матеріалу. Обґрунтування вимог до параметрів керування для БПЛА органу охорони державного кордону являє собою багатопараметричну оптимізаційну задачу, розв'язок якої лежить в області компромісів. Так, задоволення вимог щодо пропускну здатності каналу зв'язку при передачі даних телеметрії і корисного навантаження, вимагає розширення смуги частот приймально-передавального обладнання та використовувати спектрально-ефективні методи модуляції [8]. Зазначене призводить до підвищених вимог по відношенню сигнал/шум на вході приймача, зниження дальності дії радіосистеми, підвищення ймовірності бітової помилки тощо. При виборі частотного діапазону командної радіолінії

БПЛА необхідно враховувати радіус дії, висоту польоту, масогабаритні параметри та вимоги щодо заданої ймовірності бітової помилки. Одним з відповідних частотних діапазонів є діапазон 2.4 ГГц. Зазначені вимоги є компромісними. Так, прагнення забезпечити максимальний радіус дії БАК, який обмежується радіовидимістю між БПЛА та наземним комплексом керування, викликатиме потребу компенсації згасання сигналу на трасі. Для забезпечення високої якості сигналу на великих відстанях необхідно збільшувати потужність передавального пристрою, що зменшуватиме вагу корисного навантаження. Тому на першому етапі необхідно визначити оптимальні значення висоти, дальності та тривалості використання БПЛА.

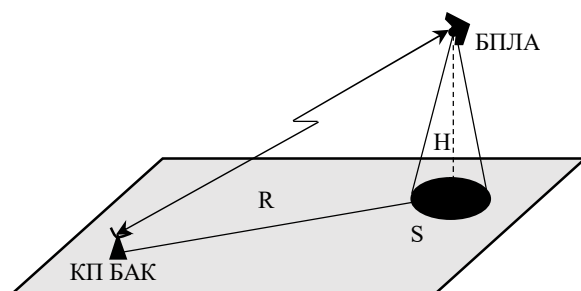


Рисунок 1 – Застосування БПЛА "Spectator-M"

У якості корисного навантаження БПЛА органів охорони державного кордону використовуються оптичні, оптикоелектронні та тепловізійні системи. Для збільшення діаметру зони контролю бортовими засобами необхідно збільшувати висоту польоту БПЛА. Для збільшення площі контрольованого прикордонного району необхідно збільшувати висоту польоту БПЛА (рис. 1). Для визначення оптимальних (раціональних) значень дальності, висоти та тривалості застосування БПЛА скористаємося такою інформаційною технологією [9].

Складемо рівнянням балансу ваги БПЛА:

$$G_{\Sigma} = G_1 + k_0 H^2 + k_R R^2 + k_T t + G_K, \quad (1)$$

де  $G_1$  – вага корисного навантаження, кг;  $k_0$  – розхід палива для забезпечення підняття БПЛА на висоту  $H$ , кг/м<sup>2</sup>; розхід палива для забезпечення польоту на дальність  $R$ , кг/км<sup>2</sup>;  $k_T$  – розхід палива для забезпечення польоту впродовж  $t$  годин, кг/год;  $G_K$  – вага конструкції БПЛА.

Нормуючі дільники для критеріїв висоти, дальності та тривалості польоту визначаються шляхом підстановки у рівняння балансу ваги мінімально допустимих значень цих критеріїв, попарно, запишемо у такому вигляді:

$$\begin{cases} H_{max} = \sqrt{G_{\Sigma} - G_1 - G_K - k_R R_{min}^2 - k_T t_{min}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_0}}, \\ R_{max} = \sqrt{G_{\Sigma} - G_1 - G_K - k_0 H_{min}^2 - k_T t_{min}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_R}}, \\ t_{max} = \sqrt{G_{\Sigma} - G_1 - G_K - k_0 H_{min}^2 - k_R R_{min}^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_T}}. \end{cases} \quad (2)$$

Для тактико-технічних характеристик БПЛА "Spectator-M", з урахуванням мінімально необхідних значень, максимально можливі значення кожного із критеріїв матимуть значення:  $R_{max} = 54$  км;  $H_{max} = 3.2$  км;  $t_{max} = 1.6$  год.

Узагальнений критерій ефективності використання БПЛА має вигляд:

$$W = \frac{R}{R_{max}} + \frac{H}{H_{max}} + \frac{t}{t_{max}}. \quad (3)$$

Пошук оптимальних значень окремих критеріїв  $R_{opt}$ ,  $H_{opt}$ ,  $t_{opt}$ , що забезпечують максимум узагальненого критерію  $W$ , здійснимо з використанням невизначених множників Лагранжа –  $\lambda$ . Тоді рівняння (3) переписеться у вигляді:

$$W = \frac{R}{R_{max}} + \frac{H}{H_{max}} + \frac{t}{t_{max}} + \lambda [G_{\Sigma} - G_1 - G_K - k_0 H^2 - k_R R^2 - k_T t]. \quad (4)$$

Прирівнявши до нуля часткові похідні функції (4) за змінними  $R, H, t$ , знайдемо оптимальні значення критеріїв для БПЛА типу "Spectator-M":  $R_{opt} = 28 \text{ км}; H_{opt} = 2.8 \text{ км}; t_{opt} = 1.2 \text{ год}$ . Для знайдених значень необхідно обрати такий тип корисного бортового навантаження, який ефективно працюватиме при максимальних й оптимальних значеннях критеріїв висоти, дальності і тривалості використання БПЛА.

Висновки та перспективи подальших розвідок у цьому напрямку. Запропонована інформаційна технологія надає можливості визначення оптимальних (раціональних) значень дальності, висоти та тривалості застосування БПЛА. Пошук оптимальних значень окремих критеріїв висоти, радіусу та тривалості застосування БПЛА здійснено з використанням невизначених множників Лагранжа для розв'язання рівняння балансу параметрів. Розраховані оптимальні (раціональні) значення використовуються для визначення корисного бортового навантаження БПЛА, при якому досягатиметься найкраща ефективність контролю державного кордону та максимальна відстань радіолінії керування. Напрямок подальших досліджень є обґрунтування комплексу заходів з захисту радіоканалу керування БПЛА.

### **Література:**

1. Илюшко В. М. (2009). Беспилотные летательные аппараты: Методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик [Текст] / В. М. Илюшко, М. М. Митрахович, А. В. Самков и др.; под общ. ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. 302 с.



2. Danyk Yu. H. (2008). Unmanned aviation in modern militant actions: monograph [Bezpilotnaaviatsiia v suchasni zbroinii borotbi: monohrafiia] / Yu. H. Danyk, V. H. Radetskyi, I. S. Rusnak. – K.: NAOU, 2008. 224 p.
3. Kusainov A. A. (2012). Development of an unmanned aerial vehicle control system along a specified trajectory [Razrabotka systemy upravleniia bespilotnym letatel'nyim apparatom pozadannoi traektorii] / Magisterskaia dySSERTatsiia. Novosibirsk: NGU, 2012. [Elektronnyi resurs], available at: [http://www.nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/395/Text\\_KusainovAA.pdf](http://www.nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/395/Text_KusainovAA.pdf).
4. Катеринчук І. С., Балицький І. І. (2018). Інформаційна технологія обґрунтування раціональних значень параметрів застосування тактичних безпілотних літальних апаратів органу охорони державного кордону. Матеріали XXII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції». (26.04.2018 р. Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Житомир). С. 74-76.
5. Балицький І. І., Лисий М. І., Поліщук В.В. (2015). Розробка методики підготовки і проведення польових випробувань безпілотних авіаційних комплексів охорони державного кордону. Зб. наук. пр. Національної академії Державної прикордонної служби України. – Хмельницький: НАДПСУ, 2015. – № 4(66), С. 262-274.
6. Ivan Katerynchuk, Oleg Shynkaruk, Ihor Balytskyi. (2018). Definition of approaches to the assessment of tactical unmanned aerial vehicles effective use in the state border guard body. TCSET-2018: 14th IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. (Lviv-Slavske, Ukraine, February 20-24, 2018). P. 1255-1259.
7. Ivan Katerynchuk, Roman Rachok, Dmytro Mul, Andrii Balender.

(2016). Application of non-stationary signals matched windowing in pulse radiolocation tasks / Proceedings of the XIII th International Conference “Modelling of Radio Waves Propagation and Creation of Radio Networks Using Geoinformation Systems” / CSET'2016, (February 23 – 26, 2016, Lviv-Slavske, Ukraine). P. 667-681.

8. Боев Н. М. (2012). Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. Выпуск 2 (42) / гл. ред. д.т.н. Ковалев И.В. – Красноярск: СибГАУ, 2012. С.86-91.

9. Брахман Т. Д. (1984). Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М.: Радио и связь, 1984. 288 с.

**References:**

1. Ilushko V. M. (2009). Bezpilotnye letatelnye aparaty: Metodiky priblijonyh raschetov osnovnyh parametrov [Unmanned aerial vehicles: Methods of approximate calculations of the main parameters and characteristics] [Text] / V. M. Ilusshko, M. M. Mytrahovych, A. V. Samkov i dr.; pod obsh. red. V. I. Sylkova. – K. : CNII VVT VC Ukraine, 2009. 302 p.

2. Danyk Yu. H. (2008). Unmanned aviation in modern militant actions: monograph [Bezpilotnaaviatsiia v suchasni zbroinii borotbi: monohrafiia] / Yu. H. Danyk, V. H. Radetskyi, I. S. Rusnak. – K.: NAOU, 2008. 224 p.

3. Kusainov A. A. (2012). Development of an unmanned aerial vehicle control system along a specified trajectory [Razrabotka systemy upravleniia bespilotnym letatelnyim apparatom pozadannoi traektorii] / Masterskaia dySSERTatsiia. Novosibirsk : NGU, 2012. [Elektronnyi resurs], available at: [http://www.nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/395/Text\\_KusainovAA.pdf](http://www.nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/395/Text_KusainovAA.pdf).

4. Katerynchuk I. S., Balytskyi I. I. (2018). Informacijna tehnologiya obg`runtuvannya racionalnyh znachen parametriv zastosuvannya

taktychnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ organu oxorony derzhavnogo kordonu. Materialy XXII Vseukrayinskoyi naukovo-praktychnoyi konferenciyi «Teoriya ta praktyka stvorennya, rozvytku i zastosuvannya vysokotekhnologichnykh system specialnogo pryznachennya z uraxuvanniam dosvidu antyterorystychnoyi operaciyi». (26.04.2018 r. Zhytomyrskyj vijskovyj instytut imeni S. P. Korolova, Zhytomyr). S. 74-76.

5. Balytskyi I. I., Lysyj N. I., Polishhuk V.V. (2015). Rozrobka metodyky pidgotovky i provedennya polovykh vyprobuvan bezpilotnykh aviacijnykh kompleksiv oxorony derzhavnogo kordonu. Zb. nauk. pr. Nacionalnoyi akademiyi Derzhavnoyi prykordonnoyi sluzhby Ukrainy. – Khmelnytskyi: NADPSU, 2015. – № 4(66), S. 262-274.

6. Ivan Katerynchuk, Oleg Shynkaruk, Ihor Balytskyi. (2018). Definition of approaches to the assessment of tactical unmanned aerial vehicles effective use in the state border guard body. TCSET-2018: 14th IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. (Lviv-Slavske, Ukraine, February 20-24, 2018). P. 1255-1259.

7. Ivan Katerynchuk, Roman Rachok, Dmytro Mul, Andrii Balender. (2016). Application of non-stationary signals matched windowing in pulse radiolocation tasks / Proceedings of the XIII th International Conference “Modelling of Radio Waves Propagation and Creation of Radio Networks Using Geoinformation Systems” / CSET'2016, (February 23 – 26, 2016, Lviv-Slavske, Ukraine). P. 667-681.

8. Boev N. M. (2012). Analiz komandno-telemetrycheskoj radyolynyi svyazy s bespilotnykh letatelnykh apparatov // Vestnyk Sybyrskogo gosudarstvennogo aerokosmycheskogo unyversyteta. Vypusk 2 (42) / gl. red. d.t.n. Kovalev Y.V. – Krasnoyarsk: SybGAU, 2012. S.86-91.

9. Brahman T. D. (1984). Mnogokryteryalnost i vybor alternativ v tehnyke. – M.: Radyo i svyaz, 1984. 288 s.