

УДК 623.74.746-519

**П. М. СТЕШЕНКО**, ад'юнкта(Державний науково-дослідний інститут авіації,  
м. Київ)

## Математична модель для оцінювання ефективності бойового застосування розвідувальних безпілотних авіаційних комплексів

Подано результати розроблення математичної моделі для оцінювання ефективності бойового застосування розвідувальних безпілотних авіаційних комплексів.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс, безпілотний літальний апарат, ефективність бойового застосування, математична модель.

Стаття посвячена решению научно-прикладной задачи оценивания эффективности боевого применения разведывательных беспилотных авиационных комплексов методами математического моделирования, которые учитывают полный цикл боевого применения БПЛА и расширенный перечень тактико-технических характеристик его целевого оборудования.

Математичне моделювання є одним з основних шляхів оцінки бойової ефективності застосування авіаційних комплексів військового призначення, що займає пріоритетне місце серед таких, як льотний експеримент (льотні випробування) та оперативний розрахунок. Потреба в значно менших коштах, у порівнянні з льотним експериментом, та висока точність розрахунку вихідних даних, у порівнянні з оперативним розрахунком, обумовила широке застосування у військовій справі математичного моделювання [1].

Аналіз відомих методик оцінювання ефективності бойового застосування (ЕБЗ) розвідувальних безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) показав, що вони, як правило, обмежуються оцінкою технічного рівня БпАК, обумовленого характеристиками, насамперед, оптичних (видимого діапазону) бортових засобів розвідки [1–5]. При цьому питання оцінювання інфрачервоних, радіолокаційних, радіотехнічних засобів розвідки, наземних засобів приймання, оброблення та передавання розвідувальної інформації, а також процесу бойового застосування розвідувального безпілотного літального апарата (БпЛА) з урахуванням типових етапів його польоту не знайшли свого комплексного вирішення в рамках відомих методик.

Вищезазначене обумовило актуальність розроблення математичної моделі (ММ) для оцінювання ЕБЗ тактичних БпАК, яка б враховувала повний цикл їх застосування та розширений перелік характеристик бортового розвідувального обладнання і засобів оброблення розвідувальної інформації.

Структурно-логічна схема побудови математичної моделі показана на рис. 1.

Формалізація процесу застосування БпАК виконана за допомогою відомих апробованих методів та математичних залежностей теорії бойової ефективності [6, 7].

Узагальненим показником ефективності бойового застосування розвідувальних БпАК є ймовірність виконання бойового завдання, що визначається за виразом [7]

$$P_{б/з} = P_{св.вил.} \cdot P_{ппо} \cdot P_{вих.} \cdot P_{виявл.} \cdot P_{інф.} \quad (1)$$

де  $P_{св.вил.}$  – ймовірність своєчасного вильоту БпЛА,  $P_{ппо}$  – ймовірність подолання зони протиповітряної оборони (ППО) противника,  $P_{вих.}$  – ймовірність виходу в заданий район розвідки,  $P_{виявл.}$  – ймовірність виявлення та розпізнавання об'єктів розвідки,  $P_{інф.}$  – ймовірність своєчасної доставки розвідувальної інформації до споживача.

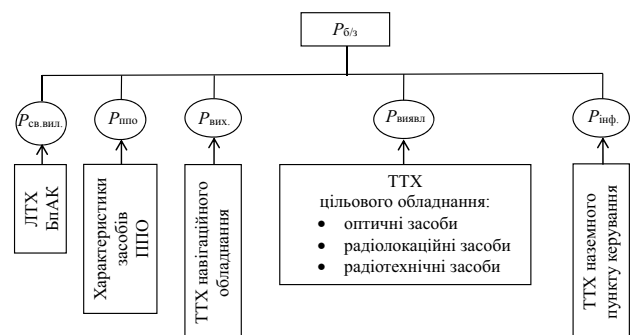


Рис. 1. Структурно-логічна схема побудови математичної моделі

Ймовірність своєчасного вильоту  $P_{\text{св.вил.}}$  оцінюється з урахуванням особливостей підготовки БпЛА до вильоту, часу на вихід у заданий район розвідки та ін. [7]:

$$P_{\text{св.вил.}} = \frac{1}{1 + \frac{T_y}{T_{\text{оч}}}} \quad (2)$$

де  $T_{\text{оч}}$  – час, протягом якого зберігається ситуація, на яку визначена розвідка;  $T_y$  – час проведення розвідки (складається з часу підготовки БпЛА до польоту та часу польоту до цілі).

Знаючи швидкість руху об'єкта  $V_0$ , можемо визначити  $T_{\text{оч}}$  [7]:

$$T_{\text{оч}} = \frac{l}{V_0}, \quad (3)$$

Ефективність протидії засобам ППО противника визначається ймовірністю подолання зони їхньої дії  $P_{\text{ппо}}$ . Проведені дослідження показали, що відомі підходи до розрахунку такого показника потребують удосконалення в частині уточнення оперативного-тактичної побудови засобів ППО противника та їх ТТХ, зокрема з урахуванням проведення АТО на сході України. Як приклад на рис. 2 зображено сучасний варіант побудови системи ППО противника.

Ймовірність подолання зони ураження комплексу ППО визначається, враховуючи характеристики комплексів ППО противника та БпЛА, що досліджується:

$$P_i = e^{-a_{\text{сер}}}, \quad (4)$$

де  $a_{\text{сер}}$  – середня кількість успішних пострілів і-го комплексу ППО,

$$a_{\text{сер}} = kWW_B, \quad (5)$$

де  $k$  – середня кількість пострілів комплексу ППО по БпЛА,  $W$  – ймовірність збиття БпЛА одним пострілом,

$W_B$  – ймовірність виявлення БпЛА засобами комплексу ППО.

Ймовірність подолання зони ураження комплексів ППО декількох типів визначається як добуток ймовірностей подолання  $n$  комплексів ППО, що можуть уражати БпЛА у процесі виконання ним завдань розвідки:

$$P_{\text{ппо}} = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (6)$$

Точність виходу БпЛА на ціль визначається точністю визначення координат навігаційною системою БпЛА, що характеризується середнім квадратичним відхиленням виходу на об'єкт, а також систематичними похибками навігаційної системи. Ці характеристики поряд з шириною смуги огляду місцевості визначають значення ймовірності потрапляння цілі в поле зору бортових засобів розвідки [7]

$$P_{\text{вих}} = P(-l_{\text{гр}} \leq l \leq +l_{\text{гр}}) = \Phi_0\left(\frac{+l_{\text{гр}} - m_i}{\sigma_i}\right) - \Phi_0\left(\frac{-l_{\text{гр}} - m_i}{\sigma_i}\right), \quad (7)$$

де  $-l_{\text{гр}}, +l_{\text{гр}}$  – граничні значення бокового відхилення ЛА від лінії заданого шляху;  $\Phi_0$  – функція Лапласа;  $m_i, \sigma_i$  – середнє значення математичного сподівання бокового відхилення БпЛА в момент виявлення цілі і його середнє квадратичне відхилення відповідно.

Граничні значення бокового відхилення ЛА від лінії заданого шляху визначаються за формулою

$$\pm l_{\text{гр}} = \frac{B}{2}, \quad (8)$$

де  $B$  – ширина ділянки, що оглядається.

Середнє значення математичного сподівання бокового відхилення ЛА в момент виявлення цілі і його середнє квадратичне відхилення визначаються за формулами

$$m_i = m_{\text{ц}} + m_{\text{н}}; \quad (9)$$

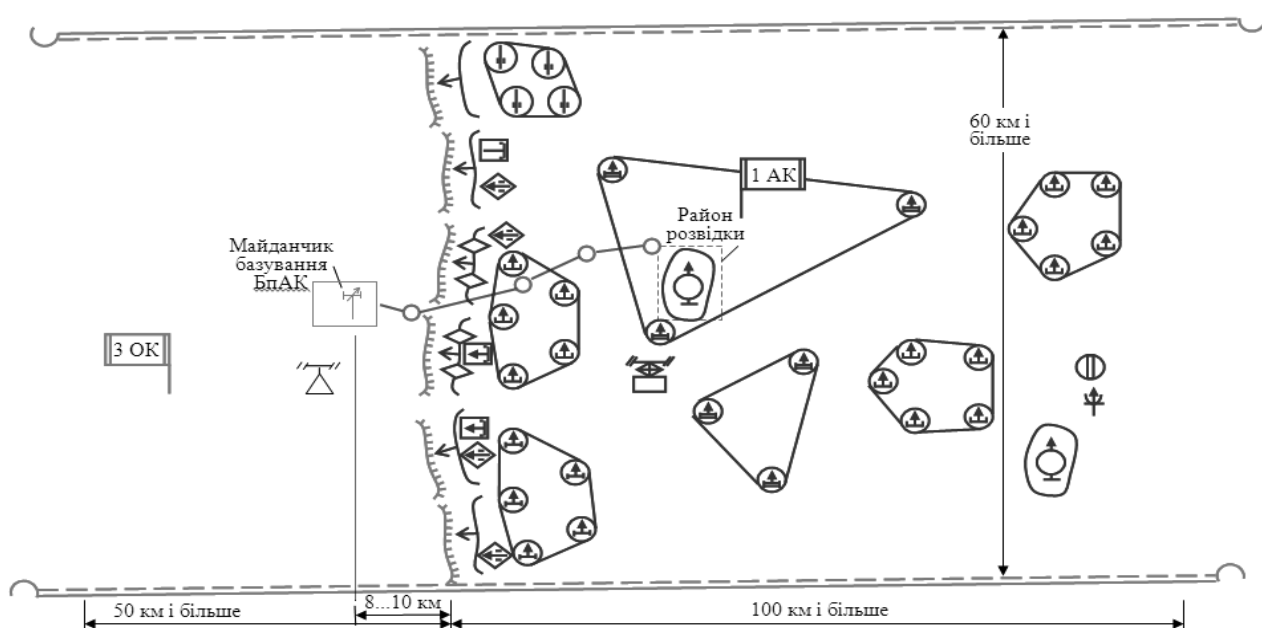


Рис. 2. Варіант побудови системи ППО противника

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\zeta}^2 + \sigma_n^2}, \quad (10)$$

де  $m_{\zeta}$ ,  $\sigma_{\zeta}$  – характеристики точності координат цілі, які відомі до вильоту;  $m_n$ ,  $\sigma_n$  – характеристики точності навігаційної системи БпЛА.

Розрахунок імовірності виявлення та розпізнавання об'єктів розвідки  $P_{\text{виявл}}$  виконується за допомогою удосконаленої формули Живичина з урахуванням характерної потрібної детальності  $d_{\text{ор}}$ , еквівалентної просторової роздільної здатності цільового спорядження  $d$  та радіометричного контрасту об'єктів  $K$  [8]:

$$P_{\text{виявл}} = \exp \left[ \frac{\ln \alpha}{\lg \frac{1+K}{1-K}} \left( \frac{d}{d_0} \right)^2 \right], \quad (11)$$

де  $\alpha$  – рівень достовірності, зазвичай  $\alpha = 0,95$ .

Еквівалентна просторова роздільна здатність цільового спорядження визначається за формулою

$$d = H \frac{a}{f}, \quad (12)$$

де  $a$  – розмір пікселя;  $f$  – фокусна відстань оптичної системи;  $H$  – висота польоту БпЛА.

Радіометричний контраст об'єктів визначається за формулою

$$K = \frac{|M_o - M_{\phi}|}{M_o + M_{\phi}}, \quad (13)$$

де  $M_o$ ,  $M_{\phi}$  – спектральна щільність енергетичної яскравості власного теплового випромінювання об'єкта і фона відповідно.

Радіометричний контраст у інфрачервоній спектро-радіометричній знімальній апаратурі при зніманні вночі визначається в основному спектральною щільністю енергетичної яскравості  $M(\lambda, T)$  власного теплового випромінювання об'єкта і фону відповідно до закону Планка [9]:

$$M_{o,\phi}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[ \exp \left( \frac{hc}{k\lambda T_{o,\phi}} \right) - 1 \right]}, \quad (13)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі електромагнітного випромінювання,  $T$  – температура об'єкта,  $h$  – стала Планка,  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $k$  – стала Больцмана.

Розроблена математична модель була апробована при оцінюванні ефективності бойового застосування тактичного БпЛА Ту-143 «Рейс» зі складу ВР-3 та його модернізованого варіанта. При цьому враховувалося, що при модернізації БпЛА обладнується, зокрема, сучасними цифровою камерою, інтегрованою супутниковою навігаційною системою, заводо захищеною системою передавання даних, новим двигуном.

Адекватність моделі перевірялася шляхом застосування непрямих методів такого оцінювання, зокрема, аналізу ступеня відображення в моделі основних елементів і процесів, правильності зроблених допущень, гіпотез і використаних апроксимацій, перевірки вірогідності вихідних даних, розмірностей і масштабування

характеристик (параметрів) у рівняннях моделі, аналізу кількісного відображення в моделі функціональних зв'язків і особливостей реального процесу (об'єкта), що моделюється, використання методу зворотного переходу. Позитивні результати аналізу показали, що є підстави стверджувати про адекватність моделі реальному процесу застосування тактичного БпЛА.

Таким чином, розроблена ММ дозволяє підвищити достовірність оцінювання ЕБЗ тактичних БпЛА за рахунок алгоритмізації повного циклу застосування БпЛА, урахування розширеного переліку характеристик бортового розвідувального обладнання та засобів оброблення розвідувальної інформації і може застосовуватися для розрахунку ймовірності виконання бойового завдання тактичними БпЛА, оцінювання технічних рішень з модернізації БпЛА щодо їх впливу на ЕБЗ, а також порівняльного аналізу альтернативних зразків тактичних БпЛА.

Подальші дослідження проводяться в частині оцінювання ефективності оброблення розвідувальної інформації на наземному пункті керування за показником ймовірності своєчасної доставки розвідувальної інформації до споживача  $P_{\text{інф}}$ .

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мавренков, О. Є. Математична модель для оцінювання бойової ефективності застосування розвідувальних тактичних безпілотних авіаційних комплексів [Текст] / О. Є. Мавренков, В. І. Улізько // Збірник наук. праць ДНДІА. – Вип. 4 (11). – К. : ДНДІА, 2008. – С. 57–60.
2. Ребрин, Ю. К. Методы количественной оценки эффективности средств аэрокосмической разведки [Текст] / Ю. К. Ребрин, С. А. Станкевич, С. П. Мосов. – К. : КИ ВВС, 1997. – 260 с.
3. Беспилотные летательные аппараты : методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик [Текст] / В. М. Ильюшко, М. М. Митрахович, А. В. Самков [и др.] ; под ред. В. И. Силкова. – К. : ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. – 302 с.
4. Беспилотные авиационные комплексы : методика сравнительной оценки боевых возможностей [Текст] / М. М. Митрахович, В. И. Силков, А. В. Самков [и др.] ; под ред. В. И. Силкова. – К. : ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. – 288 с.
5. Згурец, С. Г. Оружие Украины. Беспилотники: призыв на войну. Беспилотные авиационные комплексы: создание и применение [Текст] / С. Г. Згурец. – К. : Defense Express, 2015. – 96 с.
6. Червинский, П. И. Тактика Военно-Воздушных Сил [Текст]. Ч. I. Военно-Воздушные Силы и Противовоздушная оборона капиталистических государств / П. И. Червинский. – К., 1977. – 276 с.
7. Боевые авиационные комплексы и их эффективность [Текст] / О. В. Болховитинов, В. В. Иванов, А. А. Новожилов [и др.]. – М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1990. – 193 с.

8. Станкевич, С. А. Технологія підвищення розрізності інфрачервоних мікроболометричних спектро-радіометрів для задач цивільного захисту [Текст] / С. А. Станкевич, М. С. Лубський, К. В. Добровольська // Праці міжнародної науково-практичної конференції УкрНДЦЗ. – К., 2015. – С. 241–246.
9. Станкевич, С. А. Уточнення відомої емпіричної формули оцінки імовірності правильного

дешифрування об'єктів на аерокосмічному зображенні [Текст] / С. А. Станкевич // Збірник наук. праць ДНДІА. – Вип. 7. – К. : ДНДІА, 2004.– С. 242–246.

**Рецензент О. Є. Мавренков**, канд. техн. наук (Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ)