

Леонід Михайлович Артюшин (доктор технічних наук, професор) ¹

Олексій Анатолійович Кононов (доктор технічних наук, доцент) ¹

Володимир Вікторович Герасименко (кандидат військових наук) ²

Богдан Юрійович Наусенко ¹

¹ Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

² Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

МЕТОД ВИБОРУ ВАРІАНТА РЕАЛІЗАЦІЇ ГРУПОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Статтю присвячено науковій проблематиці передпроектного етапу створення нових видів високотехнологічних комплексів озброєння, а саме безпосередньо, апріорному обґрунтуванню вибору варіанта реалізації. Як предметну область розглянуто групове застосування безпілотних літальних апаратів. Пропонується ймовірнісний метод обґрунтування вибору. Функціонування системи "група безпілотних літальних апаратів - засоби протиповітряної оборони противника - об'єкт застосування" описується марковськими ймовірнісними моделями зміни дискретних станів у безперервному часі. У них враховується можливість диференціації інтенсивностей потоків подій залежно від станів. Доводиться, що для групового застосування безпілотних літальних апаратів можливість диференціації інтенсивностей залежно від станів не порушує вимог стаціонарності, ординарності та відсутності післядії потоків подій.

Сутність методу полягає у визначенні переваги варіантів за результатами послідовного аналізу їхніх фундаментальних властивостей. На першому етапі визначається відповідність необхідним умовам результативності групового застосування. Для порівняння пропонується застосовувати формат умови, який враховує можливість диференціації інтенсивностей потоків подій залежно від станів. На другому етапі аналізуються граничні ймовірнісні можливості аналізованих варіантів реалізації. На третьому етапі порівнюються найімовірніші ресурсні витрати, що необхідні для виконання поставлених бойових завдань. Як базис порівняння розглядаються не вартості ресурсів, а абсолютні кількісні значення. У разі неможливості визначення переваги на попередніх етапах, на четвертому етапі варіанти порівнюються за запропонованим інтегральним критерієм-згортокою. Для забезпечення об'єктивності вибору розглядається можливість визначення вагових коефіцієнтів критерію-згортки як відомими експертними методами, так й із застосуванням штучних нейронних мереж.

Відсутність необхідності прив'язки до конкретних льотно-технічних, конструктивних, динамічних особливостей літальних апаратів, специфіки схем застосування та керування дозволяє здійснити вибір варіанта реалізації з позиції найбільш загальних, фундаментальних можливостей систем групового застосування безпілотних літальних апаратів. Єдиною принциповою вимогою результативного застосування запропонованого методу є відповідність марковським умовам потоків подій системи "група безпілотних літальних апаратів - засоби протиповітряної оборони противника - об'єкт застосування".

Ця особливість запропонованого методу дозволяє здійснити вибір варіанта реалізації з позицій найбільш загальних, принципових властивостей систем групового застосування

Ключові слова: групове застосування безпілотних літальних апаратів; група безпілотних літальних апаратів; варіант реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів; безпілотні літальні апарати; ймовірність; ймовірність виконання бойового завдання; інтенсивність потоку подій; інтенсивність втрат безпілотних літальних апаратів; інтенсивність притоку безпілотних літальних апаратів; протидія; система; засоби протиповітряної оборони противника.

Вступ

Постановка проблеми. Складність створення нових видів сучасного високотехнологічного озброєння визначається, з одного боку, великим рівнем відповідальності за вибір того чи іншого варіанта реалізації та, з іншого боку, суттєвою невизначеністю, нестаціонарністю умов прийняття рішень, важливою наявністю неповної інформації.

В умовах можливість апріорного дослідження ще на передпроектній стадії властивостей можливих варіантів реалізації ставати фактично єдиним об'єктивним інструментом на формування відповідних управлінських рішень.

Особливо явно значення таких досліджень проявляється для області нових, якісно відмінних від наявних комплексів озброєння, наприклад,

перспективних систем управління груповим застосування озброєння та військової техніки.

Інтерес до даних комплексів визначається низкою важливих потенційних переваг, які вигідно відрізнятимуть їхню відмінність від інших видів сучасного високоточного озброєння.

По-перше, відсутність принципів обмежень на кількість скоординовано діючих безпілотних літальних апаратів (БпЛА) у групі дозволить долати з наперед заданою імовірністю навіть найдосконалішу систему протиповітряної оборони (ППО) та, головне, без втрат свого особового складу. По-друге, можливість підтримки сталого каналу зв'язку, передачі інформації між апаратами та пунктом управління (ухвалення рішення) дозволить кардинально розширити номенклатуру цілей для бойового застосування (вражати захищені, замасковані, мобільні цілі, цілі з апріорно невідомими координатами).

Незважаючи на значні зусилля в цьому напрямі, наявні розробки все ще знаходяться на етапі, коли відпрацьовуються різні конструктивні, технічні та технологічні підходи та рішення для реалізації (наприклад, проєкт GREMLINS [1]).

Найвищий технологічний рівень дозволяє реалізувати різноманітні концепції групового застосування безпілотних літальних апаратів, що будуть відрізнятися льотно-технічними, конструктивними, динамічними особливостями літальних апаратів, специфікою схем застосування та управління. Проте високий ризик прийняття помилкових управлінських рішень при формуванні технічних вимог для розробників стримує процес створення.

Зокрема, відкритим залишається питання щодо технічного вигляду майбутньої системи групового застосування БпЛА: концентрувати ресурси на створенні системи на основі універсальних безпілотних літальних апаратів, здатних протидіяти засобам ППО противника, або - на основі більшої кількості дешевших спеціалізованих літальних апаратів, але без функцій протидії.

Ситуація ускладнюється необхідністю одночасного обліку багатьох різноманітних факторів (наприклад, поширення зенітних снарядів із програмованим часом підриву [2], потужних мікрохвильових засобів знищення БпЛА у польоті [3] тощо).

У даний час неможливість забезпечення обґрунтованого вибору технічного вигляду є суттєвою перешкодою на шляху створення комплексів групового застосування БпЛА, а її подолання дозволить Україні зайняти провідні позиції у даному перспективному сегменті високотехнологічного військового виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у напрямі апріорного передпроектного аналізу, визначення переваги варіантів реалізації нових комплексів озброєння мають багату історію. Сплеск інтересу до цієї області був викликаний реалізацією програм створення нових видів озброєння: ракетно-ядерних

комплексів, авіаційно-космічних і протиракетних комплексів. Розвиток методів апріорного дослідження та обґрунтування переваг проєктів проходило через узагальнення досвіду приватних, конкретних рішень до створення загальних універсальних методів та підходів. Результати досліджень стосовно обґрунтування вигляду авіаційних комплексів 4+ та 4+ + покоління були опубліковані одним з авторів ще у 80-90 роки минулого століття [4 - 7].

Якщо для інших видів комплексів методи апріорного передпроектного аналізу визначення переваги отримали достатній розвиток, то для безпілотних авіаційних комплексів і, тим більше, комплексів групового застосування БпЛА, процес розвитку аналогічної методичної бази ще не завершено.

Більшість публікацій результатів досліджень у галузі спільного застосування мобільних робототехнічних об'єктів присвячено тому, як його реалізувати (досить повну англійську бібліографію за даним напрямом досліджень наведено в [8 - 10], російськомовну – в [11 - 13]). Подібна ситуація спостерігається для спрямування спільного застосування БпЛА (останні значущі результати в цій галузі представлені у бібліографії статті [14]). Незважаючи на широту охоплення теми, питання обґрунтування, яким має бути групове застосування БпЛА, щоб досягати поставленої мети в умовах жорсткої протидії, у них розглядаються фрагментарно, без конкретної концентрації уваги на методичних аспектах.

На відміну від інших напрямів створення та дослідження складних систем, де активно застосовується інструментарій апріорного аналізу, обґрунтування технічних вимог, порівняння можливих варіантів реалізації, результати подібних досліджень стосовно груп БпЛА є пропрієтарними та практично відсутні у вільному доступі.

Фактично вперше завдання апріорної оцінки умов результативного застосування груп БпЛА як високоточного озброєння системно розглянуто в [15]. Як модель функціонування системи "група БпЛА – засоби ППО – об'єкт застосування" розглянуто імовірнісну модель зміни дискретних станів марковського процесу у безперервному часі. Умовою виконання поставленого бойового завдання визначено подію, коли в зоні об'єкта застосування знаходяться одночасно n БпЛА (нижче воно позначиться як стан S_n), а основною вимогою є забезпечення імовірності цієї події $P_n(t)$ не менше заданої P^* :

$$P_n(t) > P^* \quad (1)$$

Тоді імовірності знаходження групи БпЛА у різних станах описуватимуться системою диференціальних рівнянь Колмогорова виду:

$$\frac{dP_i}{dt} = -(\mu_{i,i+1} + \eta_{i,i-1}) \cdot P_i + \mu_{i-1,i} \cdot P_{i-1} + \eta_{i+1,i} \cdot P_{i+1} \quad , \quad (2)$$

де $i = 0, \dots, n$ – індекс станів, що розглядаються, що в зоні цілі буде знаходитися одночасно не менше i літальних апаратів;

P_i – імовірність знаходження в i -му стані S_i ;

$\mu_{i,i+1}$ – інтенсивність притоку БпЛА у склад групи зі стану S_i у стан S_{i+1} ;

$\eta_{i,i-1}$ – інтенсивність втрат БпЛА через дію ППО противника зі стану S_i у стан S_{i-1} ;

t – час виконання завдання, інтервал інтегрування системи рівнянь (2) обмежено часом виконання завдання $t \in [0, T]$.

Застосування моделі (2) дозволило авторам виділити принципово необхідну умову

забезпечення групою БпЛА стохастичної вимоги (1). Воно у тому, щоб μ_0 – інтенсивність надходжень літальних апаратів у групу була більше ніж η_0 – інтенсивність втрат від засобів ППО противника:

$$\frac{\mu_0}{\eta_0} > 1 \quad (3)$$

Крім того, у [15] було отримано залежність необхідного рівня відношення інтенсивностей μ_0 и η_0 для досягнення заданої імовірності вимоги (1) (рис 1).

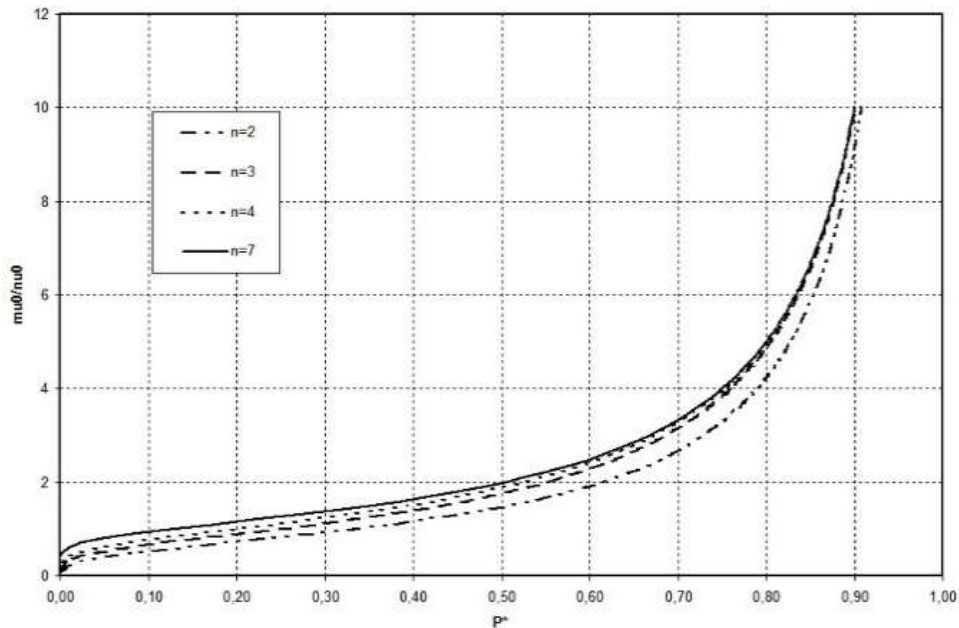


Рис.1. Графіки залежності μ_0/η_0 від P^* для різних значень n .

Ця залежність дозволяє оцінити, на скільки повинна перевищувати інтенсивність надходжень μ_0 інтенсивність втрати η_0 літальних апаратів групи, щоб забезпечити заданий рівень імовірності виконання поставленого бойового завдання P^* фіксованих значень n . При значенні відношення інтенсивностей менше ніж отримана залежність (рис. 1), забезпечити необхідний рівень імовірності буде неможливо.

Істотна перевага цього результату полягає в тому, що ця умова визначається базовими інформаційними та енергетичними закономірностями предметної галузі, що розглядається, і не залежить від конкретних конструктивно-технічних особливостей тієї чи іншої концепції реалізації ідеї групового застосування БпЛА.

Застосування моделі (2) дозволяє звести складне для обліку стохастичне обмеження (1) до еквівалентної, але зручнішої вимоги знаходження підмножини таких детермінованих параметрів системи диференціальних рівнянь (μ_{ij} , η_{ij} , n), за яких рішення матиме певні особливості. Це поширений, але результативний спосіб подолання

труднощів оперування з імовірнісними (стохастичними) обмеженнями функціонування динамічних систем, заснований на використанні імовірнісних моделей зміни дискретних станів у безперервному часі (2).

Проте в [15] розглядається лише випадок

$$\begin{cases} \mu_{i,j} = \mu_0 = const \\ \eta_{i,j} = \eta_0 = const, \\ \forall i, j \in [0, \dots, n] \end{cases} \quad (4)$$

який значно обмежує потенційні можливості застосування моделі (2) для апріорного дослідження закономірностей бойового застосування груп БпЛА. Зокрема система умов (4) фактично не дозволяє застосовувати імовірнісні моделі зміни дискретних станів у безперервному часі (2) для порівняння різних варіантів (концептуальних підходів) реалізації групового застосування БпЛА як елементів комплексів високоточного озброєння.

Метою статті є виклад результатів досліджень можливості та перспектив застосування моделі (2) для апріорного дослідження ще на передпроектній стадії вимог до можливих варіантів реалізації

групового застосування БпЛА для визначення кращого варіанта.

Математична формалізація цього завдання може бути представлена як пошук методу порівняння деяких варіантів (варіантів реалізації) групового застосування БпЛА, що описуються рівняннями (2), при розширенні області застосування моделі системою умов

$$\begin{cases} \mu_{i,j} \neq \mu_0 \\ \eta_{i,j} \neq \eta_0 \\ \forall i, j \in [0, \dots, n] \end{cases} \quad (5)$$

У цій статті під “варіантом реалізації групового застосування БпЛА” або “варіантом групового застосування БпЛА” розуміється певний технічний вигляд майбутнього зразка, концептуальний підхід до його конструювання, який однозначно визначається параметрами моделі (2) та має принципові якісні відмінності від інших варіантів.

У статті особливий упор зроблено на виявлення фундаментальних закономірностей в даній області, які можна використовувати для обґрунтування вимог з урахуванням переваги того чи іншого варіанта.

Виклад основного матеріалу дослідження

Модель (2) адекватно визначає зміну в безперервному часі імовірності знаходження системи у певних дискретних станах тільки для випадку марковського потоку випадкових подій, тому обґрунтування стаціонарності, відсутності післядії та ординарності потоку подій для випадку (5) має важливе значення.

У статті [15] обґрунтовано, що для кожного стану системи (2) за дотримання умови (4), звичайно визначених μ_0, η_0 виконуватимуться умови стаціонарності, ординарності та відсутності протидії потоку випадкових подій. При цьому

$$A = \begin{bmatrix} -\mu_{0,1} & \eta_{1,0} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mu_{0,1} & -(\mu_{1,2} + \eta_{1,0}) & \eta_{2,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mu_{1,2} & -(\mu_{2,3} + \eta_{2,1}) & \eta_{3,2} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{2,3} & -(\mu_{3,4} + \eta_{3,2}) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \eta_{n,n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{n-1,n} & -\eta_{n,n-1} \end{bmatrix}$$

та характеру рішень характеристичного рівняння системи (2), що визначається його коренями:

$$\det(A - E \cdot p) = 0, \quad (6)$$

де A – динамічна матриця системи (2),

E – одинична матриця розмірності $n \times n$, p – корені характеристичного рівняння.

Отже, можна констатувати, що випадок (4) не порушує виконання умов стаціонарності, ординарності та відсутності протидії потоку випадкових подій моделі (2).

Зняття обмеження (4) дозволяє суттєво розширити виразні можливості застосування моделі (2) для подання різних варіантів реалізації групового застосування БпЛА як засобу

жодних додаткових обмежень, крім кінцівки та детермінованості, не накладаються на μ_0 і η_0 .

Розглянемо стан системи (2) у разі (5), коли у зоні цілі перебуватиме БпЛА. Воно буде характеризуватись деякими кінцевими детермінованими значеннями інтенсивності надходжень літальних апаратів μ_{ij} та інтенсивності їх ураження η_{ij} . Відповідно до [15], у цьому стані виконуватимуться умови стаціонарності, ординарності та відсутності протидії потоку випадкових подій.

Аналогічний висновок можна зробити для інших станів системи (2) у разі (5): $0, 1, 2, \dots, i - 1, i, i + 1, \dots, n$. Виходить, що для всіх станів системи (2) у випадку (5) виконуватимуться марковські умови найпростішого потоку випадкових подій. Це означає, що при бойовому застосуванні в наслідку дії засобів ППО противника може змінитися кількісний та якісний склад групи, але головні фундаментальні властивості системи (2) не зміняться.

Оскільки під “груповим застосуванням” розуміється спільне, чітко скоординоване функціонування кількох БпЛА без необхідності витримування заданих дистанцій, інтервалів та перевищень щодо “провідного” БпЛА, то втрата окремого апарата не призведе до втрати інших літальних апаратів, тому імовірність виникнення таких подій відповідатиме показниковому розподілу із щільністю імовірності $f_i(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t}$, а імовірність втрати апарата в i -му стані на невеликому інтервалі часу буде визначатися як $P_i(\Delta t) \approx \lambda_i \cdot \Delta t$, що відповідає вимогам найпростішого потоку подій.

Крім того, розгляд випадку (5) не змінює структури динамічної матриці системи (2):

дистанційного високоточного ураження захищених цілей противника.

Наприклад, при

$$\begin{cases} \mu_{i,j} = \mu_0 + \Delta\mu_{i,j} \\ \eta_{i,j} = \eta_0 \\ n(P_n > P^*) = n_0 \\ \Delta\mu_{i,j} > 0 \\ \forall i, j \in [0, \dots, n] \end{cases} \quad (7)$$

модель (2) описуватиме групу, в якій пріоритет віддано збільшенню інтенсивності надходжень літальних апаратів (на відміну від “базисного” варіанта, що характеризується μ_0, η_0, n_0) і вважається, що саме за рахунок збільшення кількості використовуваних БпЛА буде гарантуватися виконання поставленого завдання в

умовах протидії ворожій ППО. У даному варіанті основою забезпечення високої імовірності виконання поставленої бойової задачі є кількісне збільшення складу групи, застосування кількості БпЛА більше ніж може бути знищено засобами ППО. Для цього варіанта протидія засобам ППО противника не є пріоритетною. Досягнення цілі застосування пропонується забезпечити шляхом збільшення кількісного складу групи.

При

$$\begin{cases} \mu_{i,j} = \mu_0 \\ \eta_{i,j} = \eta_0 - \Delta\eta_{ij} \\ n(P_n > P^*) = n_0 + 1 \\ \Delta\eta_{i,j} > 0 \\ \forall i, j \in [0, \dots, n] \end{cases} \quad (8)$$

модель (2) описуватиме комплекс, у якому головне – це придушення засобів ППО противника, зниження їх можливостей щодо протидії. В даному випадку саме за рахунок цього планується забезпечити задану імовірність виявлення та ураження цілі. Цей варіант реалізації групового застосування передбачає застосування обмеженої кількості літальних апаратів, але з розширеним функціоналом. БпЛА групи повинні виконувати не лише функції пошуку, ідентифікації цілі та її поразки, а також функції виявлення і знищення засобів ППО противника. У цьому варіанті пріоритетом стає здатність БпЛА групи протидіяти системи ППО противника, а не забезпечувати високу імовірність виконання поставленого завдання лише за рахунок великої кількості літальних апаратів у складі групи.

Відповідно, варіанту групового застосування БпЛА, коли забезпечуватиметься значний приплив літальних апаратів, і вони володітимуть функціональними можливостями з придушення протидії засобів ППО противника, відповідатиме модель (2) за умови

$$\begin{cases} \mu_{i,j} = \mu_0 + \Delta\mu_{i,j} \\ \eta_{i,j} = \eta_0 - \Delta\eta_{i,j} \\ n(P_n > P^*) = n_0 \\ \Delta\mu_{i,j} > 0 \\ \Delta\eta_{i,j} > 0 \\ \forall i, j \in [0, \dots, n] \end{cases} \quad (9)$$

Це показує досить широкі можливості щодо представлення різних концепцій групового застосування БпЛА у форматі моделі (2).

Особливістю моделі (2) за умови (4) є симетричність впливу інтенсивностей μ_0 і η_0 на імовірності P_i . Підтвердженням цього є симетрія часткових похідних $\frac{\partial P_i}{\partial \mu_0}$ і $\frac{\partial P_i}{\partial \eta_0}$ відносно розглянутих інтенсивностей. З неї випливає, що однакові збільшення інтенсивностей $\Delta\mu_0 = \Delta\eta_0$ призведуть до однакової зміни імовірностей ΔP_i .

З практичної точки зору це означає, що необхідну імовірність виконання поставленого бойового завдання група БпЛА може забезпечити з рівним успіхом як за рахунок збільшення

інтенсивності надходжень нових літальних апаратів до складу групи, так і за рахунок зниження інтенсивності втрати літальних апаратів внаслідок дії засобів ППО противника.

Розширення області умов (5) розгляду моделі (2) кардинально змінює характер залежностей. Розгляд зростаючих (або спадних) послідовностей значень $\mu_{i,j}, \eta_{i,j}$ для $i, j = 0, \dots, n$ порушує симетрію впливу. З неї випливає, що однакові збільшення інтенсивностей $\Delta\mu_{i,j}, \Delta\eta_{i,j}$ не завжди призводитимуть до однакової зміни імовірностей ΔP_i .

З'являється можливість забезпечити необхідну результативність застосування групи БпЛА більш ефективним способом або шляхом збільшення інтенсивності надходжень літальних апаратів та зниження їх вартості, або шляхом розширення їх можливостей щодо протидії засобам ППО противника при вимушеному подорожчанні літальних апаратів.

Варіант реалізації групового застосування, відповідний (9), не може розглядатись як реалістичний. Одночасне здешевлення БпЛА та розширення їхнього функціоналу з протидії противнику є суперечливими вимогами і на практиці не може бути забезпечено в рамках наявного конструктивно-технологічного базису.

У [15] було відзначено високу чутливість необхідних значень μ_0 і η_0 до змін бажаного рівня імовірності виконання поставленого бойового завдання P^* : будь-яке невелике збільшення P^* вимагає значного збільшення інтенсивності надходжень літальних апаратів до складу групи та значного зниження інтенсивності їхньої втрати.

Розгляд умови (5) дозволяє розкрити інші нелінійні залежності моделі (2). Насамперед, це різний вплив аналізованих інтенсивностей потоків випадкових подій на імовірні результати бойового застосування групи літальних апаратів, що є принциповою основою для можливості порівняння різних варіантів реалізації групового застосування у форматі моделі (2).

Крім того, було зазначено, що розширення умов розгляду моделі (2) умовою (5) дозволяє досягти необхідної високої імовірності виконання поставленого бойового завдання P^* , у разі коли інтенсивність надходжень літальних апаратів $\mu_{0,1}$ менше ніж інтенсивність втрати літальних апаратів внаслідок дії засобів ППО противника $\eta_{1,0}$.

Наприклад, для випадку (7) при $n = 5$; $P^* = 0,6$; вектору початкових значень імовірностей $\bar{P}(0) = [1; 0; 0; 0; 0]$ та значення векторів інтенсивностей, наведених у частках від параметра дискретизації часу k :

$$\begin{cases} \bar{\mu} = [0,06; 0,07; 0,26; 0,28; 0,29]^T \\ \bar{\eta} = [0,09; 0,09; 0,09; 0,09; 0,09]^T \end{cases} \quad (10)$$

часові залежності імовірностей $P_i(t)$ ілюструють цю можливість (рис. 2).

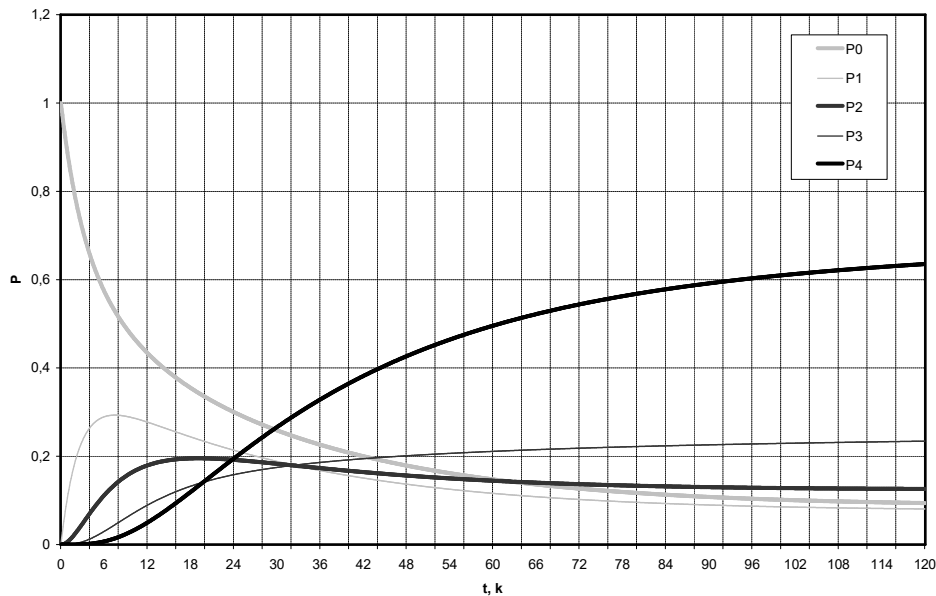


Рис. 2. Графіки залежності $P_i(t)$ для випадку (10).

Навіть порушення умови (3) не тільки для нульового, але і перших станів не є принциповим обмеженням для досягнення необхідної високої імовірності виконання поставленого бойового завдання P^* , наприклад, для випадку (8), векторів інтенсивностей (при $n = 5$; $P^* = 0,67$; $\bar{P}(0) = [1; 0; 0; 0; 0; 0]$):

$$\begin{cases} \bar{\mu} = [0,14; 0,14; 0,14; 0,14; 0,14]^T \\ \bar{\eta} = [0,16; 0,15; 0,08; 0,07; 0,05]^T \end{cases} \quad (11)$$

Недостатня інтенсивність надходжень літальних апаратів до групи порівняно з інтенсивністю втрат у станах S_0 та S_1 компенсується її значним приростом в інших станах, тому система зможе забезпечити необхідну можливість виконання поставленого завдання $P_4(t) > P^*$ збільшенням часу його виконання (рис. 3).

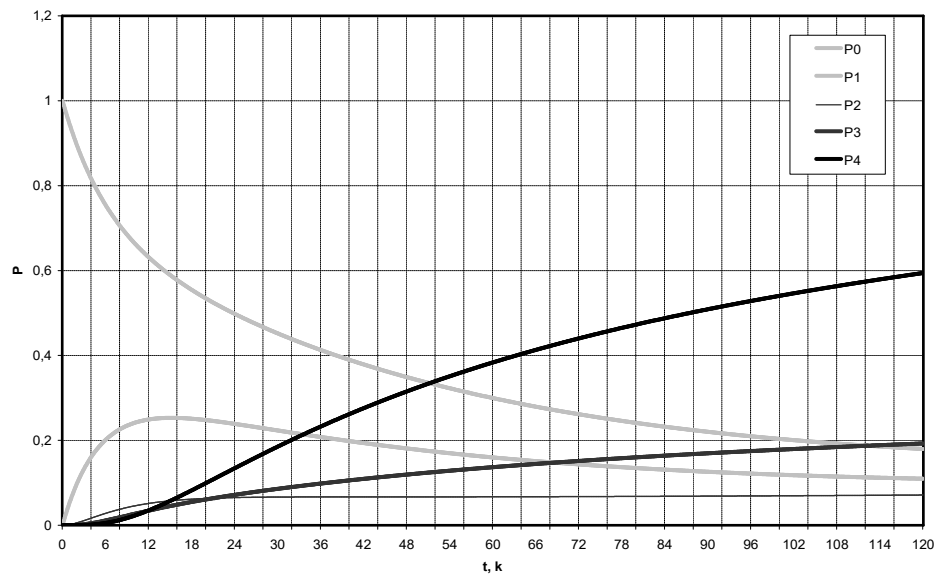


Рис. 3. Графіки залежності $P_i(t)$ для випадку (11).

При розгляді обмеження (4) модель (2) не дозволяє виявити цей ефект, про що свідчать залежності $P_i(t)$ (рис. 4) для умов:

$$\begin{cases} n = 5 \\ P^* = 0,6 \\ \bar{P}(0) = [1; 0; 0; 0; 0; 0] \\ \bar{\mu} = [0,06; 0,07; 0,26; 0,28; 0,29] \\ \bar{\eta} = [0,16; 0,15; 0,08; 0,07; 0,05] \end{cases} \quad (12)$$

Якщо результат випадку (12) можна пояснити, виходячи з необхідної умови (рис. 1), отриманого в [15], то випадки (10) і (11) показують його обмежену застосовність: щодо інтенсивностей менше 1 вдається забезпечити імовірність виконання завдання $P^* = 0,67$. Це вказує на те, що необхідні умови (1) та (3) (рис. 1) є прийнятними лише для випадку (4).

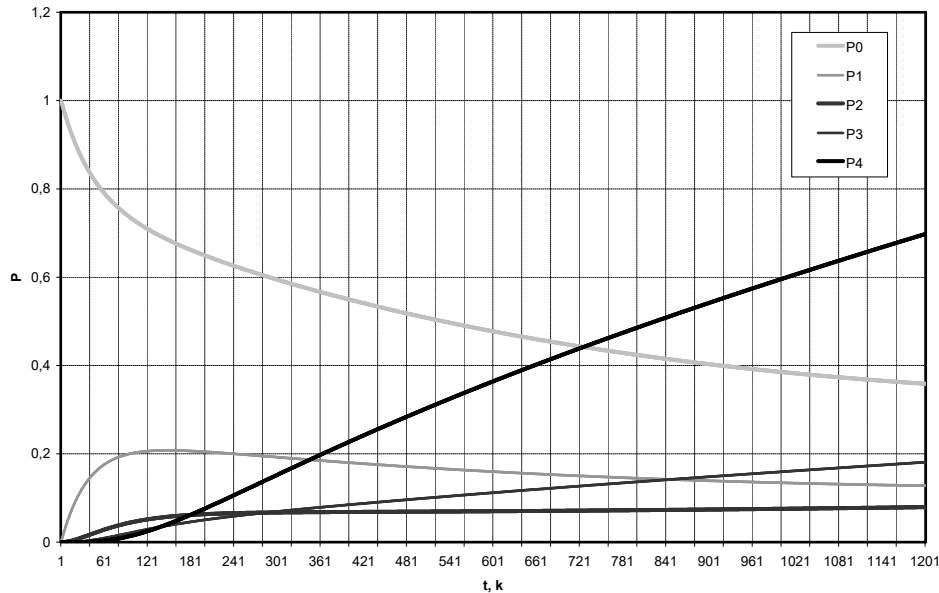


Рис. 4. Графіки залежності $P_i(t)$ для випадку (12).

Якщо результат випадку (12) можна пояснити, виходячи з необхідної умови (рис. 1), отриманого в [15], то випадки (10) і (11) показують його обмежену застосовність: щодо інтенсивностей менше 1 вдається забезпечити імовірність виконання завдання $P^* = 0,67$. Це вказує на те, що необхідні умови (1) та (3) (рис. 1) є прийнятними лише для випадку (4).

Наведена особливість проявляється за різних значень n , P^* , $\tilde{P}(0)$ та вказує на необхідність уточнення умови (3) для області застосування моделі (5). Якщо для (4) воно полягало в тому, щоб інтенсивність надходжень літальних апаратів до складу групи була більшою ніж інтенсивність втрат БПЛА, то, з урахуванням (5), його пропонується подати у вигляді:

$$\frac{\mu_{0,1} \cdot \mu_{1,2} \cdot \mu_{2,3} \dots \mu_{n-2,n-1} \cdot \mu_{n-1,n}}{\eta_{1,0} \cdot \eta_{2,1} \cdot \eta_{3,2} \dots \eta_{n-1,n-2} \cdot \eta_{n,n-1}} > 1 \quad (13)$$

який визначає, щоб добуток інтенсивностей надходжень БПЛА в групі у всіх аналізованих станах було більшим за добуток інтенсивностей втрат літальних апаратів.

Умова (13) є узагальненням отриманого [15] співвідношення на випадок (5): при $\mu_{i,j} = \mu_0$ та $\eta_{i,j} = \eta_0$ воно зводиться до умови (3). Але на відміну від формулювання, запропонованого в [15], є універсальним, застосовним як для випадку (4), так і випадку (5).

Практично важливим наслідком умови (13) є те, що вести мову про реалізованість майбутньої системи управління груповим застосуванням БПЛА можна, тільки якщо добуток усіх інтенсивностей надходжень літальних апаратів буде більшим ніж інтенсивності втрат БПЛА від дій засобів ППО противника.

Система диференціальних рівнянь (2) є лінійною і стаціонарною, але її зручне символічне розв'язання у квадратурах існує лише в особливих випадках і для невеликих значень n . В інших випадках розв'язання рівнянь потребує чисельного

інтегрування, що обмежує можливості апріорного аналізу. Тому властивість системи (2), яка полягає в існуванні граничних імовірностей для кожного аналізованого стану, незалежних від початкових умов, надає додаткові можливості для апріорного дослідження вимог до варіантів реалізації без необхідності обов'язкового чисельного моделювання.

Гранична імовірність знаходження системи (2) у стані, що жоден БПЛА не опиниться в зоні цілі \tilde{P}_0 , буде визначатися компонентами векторів інтенсивностей $\tilde{\mu}$ і $\tilde{\eta}$, n :

$$\tilde{P}_0 = \frac{1}{1 + \frac{\mu_{0,1}}{\eta_{1,0}} + \frac{\mu_{0,1}\mu_{1,2}}{\eta_{1,0}\eta_{2,1}} + \dots + \frac{\mu_{0,1}\mu_{1,2}\dots\mu_{n-1,n}}{\eta_{1,0}\eta_{2,1}\dots\eta_{n,n-1}}} \quad (14)$$

а гранична імовірність знаходження системи у станах, що у зоні цілі буде БПЛА \tilde{P}_i , буде визначатись добутком:

$$\tilde{P}_i = \frac{\mu_{0,1} \cdot \mu_{1,2} \dots \mu_{i-1,i}}{\eta_{1,0} \cdot \eta_{2,1} \dots \eta_{i-1,i}} \cdot \tilde{P}_0 \quad (15)$$

Розгляд граничних імовірностей станів \tilde{P}_i дозволяє апріорно виділити важливі закономірності реалізації групового застосування БПЛА без необхідності постійного інтегрування.

Якщо для даного варіанту гранична імовірність знаходження системи в стані S_N буде менша за необхідну P^* , то це буде свідчити про принципову обмеженість розглянутого варіанту можливості досягнення необхідних імовірнісних показників. Тому всі кращі варіанти групового застосування повинні задовольняти умові:

$$\tilde{P}_n > P^* \quad (16)$$

Асимптотичному прагненню \tilde{P}_i до 1 для всіх розглянутих варіантів відповідає монотонно зростаюче зі збільшенням значень $\mu_{i,j}$ розв'язання системи рівнянь (2) для всіх значень n (при дотриманні нерівності (13) і монотонно спадне розв'язання при збільшенні значень $\eta_{i,j}$, а визначення залежності меж P_i від змінюваних

параметрів у стаціонарному випадку ($t \rightarrow \infty$) дозволяє зробити апіорну оцінку.

Для всіх трьох аналізованих вище варіантів організації групового застосування (7), (8), (9) є справедливим значення межі:

$$\lim_{\substack{\mu_i \rightarrow \infty \\ \eta \rightarrow 0}} \frac{\mu_{0,1} \cdot \mu_{1,2} \cdot \dots \cdot \mu_{i-1,i}}{\eta_{1,0} \cdot \eta_{2,1} \cdot \dots \cdot \eta_{i,i-1}} \cdot \tilde{P}_0 = 1 \quad (17)$$

для усіх натуральних i , додатних раціональних значень інтенсивностей, де \tilde{P}_0 визначається рівнянням (14).

Це означає, що шляхом реалізації всіх варіантів (7), (8), (9) є принципова можливість забезпечити необхідну імовірність виконання поставленого завдання P^* . Її можна забезпечити зосередивши ресурси на підвищення інтенсивності надходжень літальних апаратів у групу або поліпшення протидії засобам ППО противника.

Розгляд граничних імовірностей станів дозволяє апіорно, на передпроектному етапі визначити для кожного варіанта, що оцінюється, принципові вимоги до можливості досягнення того чи іншого результату.

Проте аналіз імовірностей (14), (15) не дозволяє оцінити ресурсні витрати на досягнення необхідної якості функціонування майбутньої системи управління груповим застосуванням БпЛА.

У прикладному плані оцінка ресурсних потреб є визначальною: з двох варіантів реалізації, які потенційно дозволяють забезпечити необхідну можливість виконання поставленого завдання, кращим буде той варіант, у якого будуть менші ресурсні потреби.

Різний час виконання поставленого завдання, різні інтенсивності надходжень та втрат літальних апаратів, які характеризують аналізовані варіанти реалізації групового застосування, вказують на те, що і ресурсні потреби у них будуть різні.

Модель (2) не призначена для опису та врахування вартості бойового застосування групи БпЛА, будь-яке введення до неї додаткових параметрів є штучним і таким, що не має фізичного обґрунтування.

Тим не менш, в рамках моделі (2) є можливість оцінки ресурсів, необхідних для досягнення поставленої мети застосування, для різних варіантів реалізації групового застосування.

Розглянемо функціонал:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \left(\int_0^T P_i(t) \cdot \eta_i dt \right), \quad (18)$$

де T – час, необхідний системі для виконання умов (1). Підінтегральний вираз є найбільш імовірними втратами БпЛА, необхідними для досягнення мети застосування, якщо система перебуватиме в стані (5). Тоді сума за всіма станами дозволить визначити імовірні кількісні втрати БпЛА конкретного варіанту групового застосування для досягнення поставленої мети. Функціонал (18) можна розглядати в якості критерію порівняння різних варіантів реалізації групового застосування. При інших рівних показниках варіанту, який має

перевагу, буде відповідати найменше значення функціонала Φ .

Аналогічно (18), функціонал

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \left(\int_0^T P_i(t) \cdot \mu_i dt \right), \quad (19)$$

характеризуватиме імовірну кількість БпЛА, які буде необхідно залучити для виконання поставленого бойового завдання в рамках розглянутого варіанта організації групового застосування. Значення функціонала Ψ визначатиметься початковими умовами, часом виконання бойового завдання та інтенсивностями надходжень БпЛА до групи у кожному стані. Така залежність дозволяє розглядати його як ще один критерій вибору варіанту групового застосування БпЛА. Фізичний зміст його застосування не відрізнятиметься від функціоналу Φ : за інших рівних умов бажаному варіанту буде відповідати найменше значення функціоналу Ψ . У сукупності, функціонали (18) і (19) характеризують ресурсні потреби, необхідні для досягнення поставленої мети конкретним варіантом групового застосування БпЛА і можуть використовуватися для обґрунтування кращого варіанта.

Для двох варіантів, що характеризуються відповідно значеннями функціоналів $\Phi_1, \Psi_1, \Phi_2, \Psi_2$, можливі чотири випадки. Випадки

$$\begin{cases} \Phi_1 < \Phi_2, \\ \Psi_1 < \Psi_2, \end{cases} \begin{cases} \Phi_1 > \Phi_2, \\ \Psi_1 > \Psi_2, \end{cases} \quad (20)$$

є тривіальними і дозволяють однозначно визначити перевагу варіантів. Найкращому варіанту відповідатиме менша кількість втрат і менша кількість необхідних БпЛА.

На відміну від них, визначення переваги варіантів для

$$\begin{cases} \Phi_1 > \Phi_2, \\ \Psi_1 < \Psi_2, \end{cases} \begin{cases} \Phi_1 < \Phi_2, \\ \Psi_1 > \Psi_2, \end{cases} \quad (21)$$

вимагає врахування додаткових факторів і представляє дослідницький інтерес.

Визначення, наскільки важливим є зменшення втрат у порівнянні зі збільшенням задіяних у групі БпЛА, передбачає введення згортки функціоналів:

$$J = K_\Phi \cdot \Phi + K_\Psi \cdot \Psi, \quad (22)$$

де K_Φ – ваговий коефіцієнт важливості обліку імовірних втрат БпЛА на виконання бойового завдання; K_Ψ – ваговий коефіцієнт важливості обліку можливих витрат БпЛА на виконання бойового завдання. Фізичний сенс визначення переваги при розгляді (22) полягає в тому, що вигіднішим буде той варіант, значення згортки для якого буде менше, тобто менші відносні витрати БпЛА та відносні втрати.

Згортка функціоналів дозволить однозначно визначити перевагу варіантів реалізації групового застосування БпЛА щодо заданого базису вагових коефіцієнтів K_Φ та K_Ψ . Для випадків (21) саме співвідношення даних вагових коефіцієнтів визначатиме критерій для вибору. Оскільки

значення функціоналів теоретично обмежено діапазонами:

$$\begin{cases} \Phi \in \left[0; \int_0^T \mu_{max} dt\right] \\ \Psi \in \left[0; \int_0^T \eta_{max} dt\right] \end{cases} \quad (23)$$

де μ_{max} та η_{max} – максимальні значення інтенсивностей надходжень та втрат БпЛА, то діапазон значень згортки повинен належати діапазону:

$$J \in \left[0; K_{\Phi} \cdot \int_0^T \mu_{max} dt + K_{\Psi} \cdot \int_0^T \eta_{max} dt\right], \quad (24)$$

де правий край є зваженою сумою гранично можливої кількості задіяних літальних апаратів і гранично можливих бойових втрат літальних апаратів через протидію противника.

Введення згортки функціоналів є поширеним підходом на формування критеріїв вибору: сьогодні розроблено багато методів обґрунтування співвідношення значень вагових коефіцієнтів. Всі вони є засновані на використанні конкретних особливостей предметної області, що розглядається.

Для групового застосування БпЛА обґрунтувати співвідношення значень вагових коефіцієнтів згортки функціоналів (22) пропонується на основі аналізу вартісних співвідношень. Нехай C_{Φ} – узагальнена вартість застосування одного БпЛА у аналізованій операції, а C_{Ψ} – узагальнена вартість втрати одного БпЛА групи через протидію противника. Тоді доцільно визначити співвідношення значень коефіцієнтів згортки пропорційно до співвідношення цих вартостей:

$$\frac{K_{\Phi}}{K_{\Psi}} = \frac{C_{\Phi}}{C_{\Psi}}. \quad (25)$$

Наприклад, узагальнена вартість втрати одного БпЛА групи через протидію противника в 10 разів перевищує узагальнену вартість застосування одного БпЛА в аналізованій операції. Для варіантів (7) і (8), які відповідають умовам (13) і (16), неможливо визначити перевагу без розгляду значень функціоналів Φ і Ψ .

Для характеристик цих варіантів (10), (11) значення функціоналів складуть відповідно: $\Phi_1 = 11,39$ та $\Psi_1 = 21,99$ літальних апаратів; $\Phi_2 = 14,40$ та $\Psi_2 = 18,56$ літальних апаратів.

Ці дані відповідають випадку (21), коли неможливо безпосередньо визначити перевагу варіантів, і припускають застосування згортки (22). Для вибраного базису вагових коефіцієнтів $K_{\Phi} = 10$, $K_{\Psi} = 1$ значення згортки становитимуть відповідно $J_1 = 135,89$ та $J_2 = 162,56$ літальних апаратів. Це означає, що з вибраного базису вагових коефіцієнтів перевагу має варіант групового застосування БпЛА, у якому акцент зроблено на протидію засобам ППО противника і частина літальних апаратів застосовуються саме для цього. Результати проведеного апріорного аналізу показують, що в цьому випадку можна

забезпечити необхідні імовірнісні характеристики групового застосування БпЛА з мінімальними втратами.

Отже, розглядаючи марковські імовірні безперервні моделі зміни кінцевого набору дискретних станів, аналізуючи відповідність необхідній умові результативності групового застосування (13), граничні імовірнісні властивості, які визначаються рівняннями (14), (15), значення функціоналів (18) і (19), можна оцінити перевагу того чи іншого варіанта реалізації групового застосування БпЛА відповідно до висунутих вимог ще на передпроектному етапі, що може стати визначальним аргументом при прийнятті управлінських рішень.

Відсутність прив'язки в даному випадку до конкретних льотно-технічних, конструктивних, динамічних особливостей літальних апаратів, специфіки схем застосування та управління дозволяє обґрунтувати вибір на принципових властивостях варіантів реалізації, які визначаються найбільш загальними інформаційно-енергетичними процесами взаємодії складових частин системи “група БпЛА – засоби ППО – об’єкт застосування”.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Проведене дослідження дозволяє зробити такі висновки:

1. Застосування марковської моделі безперервної зміни імовірності знаходження в дискретних станах (2) за умов (4) та (5) дозволяє провести апріорний аналіз (на передпроектному етапі розробки) варіантів реалізації групового застосування БпЛА та визначити їхню перевагу. Перевага визначається на підставі порівняння результатів аналізу фундаментальних властивостей кожного варіанту реалізації. Це – відповідність необхідній умові результативності застосування групи (13), граничні імовірнісні можливості кожного варіанта (14), (15), рівень необхідних імовірних витрат для кожного варіанта (18), (19), (22). Можливість абстрагування від конкретних льотно-технічних, конструктивних, динамічних особливостей літальних апаратів, специфіки схем застосування та управління дозволяє розглянути широкий спектр варіантів з позицій найбільш загальних принципових властивостей систем управління груповим застосуванням БпЛА.

2. На першому етапі пропонується визначити відповідність аналізованих варіантів необхідною умовою результативності (13). Воно визначає, щоб добуток інтенсивностей надходжень БпЛА в групи у всіх аналізованих станах було більшим за добуток інтенсивностей втрати літальних апаратів від дій засобів ППО противника.

3. Наступним етапом методу пропонується розглянути граничні імовірнісні характеристики моделі (2). Вони дозволять оцінити потенційні можливості схеми реалізації групового застосування БпЛА у забезпеченні необхідної

імовірності вибіркового ураження цілі при протидії противника.

4. У разі рівних оцінок пропонується розглянути варіанти значення функціоналів (18), (19), які характеризують їхні імовірні ресурсні потреби. Варіант з найменшими можливими витратами і втратами БпЛА для виконання поставленого завдання буде мати перевагу.

5. Якщо проведений аналіз не дозволяє однозначно визначити перевагу варіантів, то пропонується розглянути лінійну згортку функціоналів (22), яка, відносно заданих вагових коефіцієнтів, вкаже на варіант з меншими відносними витратами та втратами БпЛА.

6. Наступним доцільним напрямом досліджень у цій галузі є застосування моделі (2) для апіорної оцінки впливу динамічних властивостей літальних апаратів, функціональних можливостей наземного

та бортового обладнання на загальну результативність групи. Це дозволить із нових позицій уточнити технічні вимоги до БпЛА для групового застосування та прискорити процес здійснення проєктів його реалізації.

7. Одними з найбільш перспективних, за наявності достатньої навчальної вибірки, є методи на основі штучних нейронних мереж. Нейронна мережа сама формує всі необхідні коефіцієнти, виходячи з наявних статистичних даних (навчальної вибірки). У слабкоструктурованих та недостатньо вивчених задачах проблемою може бути визначення структури нейронної мережі (кількість внутрішніх шарів та нейронів у них), а також визначення оптимальної кількості епох навчання, які гарантують навчання мережі без перенавчання.

Література

1. **DARPA**, Dynetics move Gremlins focus to aerial recovery URL: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/darpa-dynetics-move-gremlins-focus-to-aerial-recovery>. 2. **Air Defence Systems** URL: https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/air_defence_systems/index.php. 3. **RYAN BOETEL** Animated Air Force video shows downing of drones URL: https://www.stripes.com/branches/air_force/2021-06-09/Animated-Air-Force-video-shows-downing-of-drones-1663512.html. 4. **Artyushin L.M., Solov'ev V.I.** Performance monitoring for joint operation by a group of moving objects / *Kibernetika i Vychislitel'naya Tekhnika*, 1987, 3, p. 67-70. 5. **Artyushin L.M.** Problems of controlling the configuration of a mechanical system / *Soviet Applied Mechanics*, 1987, 23(2), p. 185-190. 6. **Artyushin L.M.** Search for optimal laws of variation of the control forces in dynamical system control problems / *Soviet Applied Mechanics*, 1988, 24(3), p. 295-300. 7. **Artyushin L.M., Malyshenko S.V.** Features of taking the constraints on control actions into account when solving optimization problems by the inverse dynamics problems method / *Journal of automation and information science*, 1996, 28(3), p. 24-27. 8. **Kozlovski K.R.** *Robot Motion and Control*. - Springer-

Verlag Berlin Heidelberg, 2009. - 462p. 9. **Asama H.** *Distributed Autonomous Robotic Systems 2* / Asama H., Fukuda T., Arai T., Endo I. - Springer Japan, 1996. - 442p. 10. **Tsourdos A.** *Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles* / Tsourdos A., White B., Shanmugavel M. - John Wiley & Sons, 2011. - 187p. 11. **Каляев И.А.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 280с. 12. **Абросимов В.К.** Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. - М.: Литрес, 2017. - 413с. 13. **Моисеев В.С.** Групповое применение беспилотных летательных аппаратов: монография. - Казань: Редакционно-издательский центр "Школа", 2017. - 572с. 14. **Артюшин Л.М.** Базові умови прийняття рішення щодо створення автоматизованої системи управління груповим застосуванням безпілотних літальних апаратів / Артюшин Л.М., Герасименко В.В., Коваль В.В. // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. - К: НУОУ, 2021. - №1(40). - С. 63-68. 15. **Артюшин Л.М., Кононов О.А., Шморгун Ю.В.** Метод формування спільної авіаційної групи / Артюшин Л.М. // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. - К: НУОУ, 2019. - №2(35). - С. 49-54.

METHOD OF CHOOSING REQUIREMENT TO OPTIONS OF GROUP USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

*Leonid Artyushin (Doctor of Technical Sciences, Professor)¹
Aleksey Kononov (Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor)¹
Volodymyr Herasymenko (PhD in military sciences)²
Bohdan Nausenko¹*

¹ *State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine*

² *National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine*

The scientific problem of the pre-project stage of creating new types of high-tech weapon systems, directly, to the a priori justification for choosing an implementation option is devoted in this article. The group use of unmanned aerial vehicles is considered as a subject area. A probabilistic method for substantiating the choice is proposed. The functioning of the system "a group of unmanned aerial vehicles - enemy air defense systems - an object of application" is described by Markov probabilistic models of changes in discrete states in continuous time. They take into account the probability of differentiating the intensities of event flows depending on the states. It is proved that for the group use of unmanned aerial vehicles, the probability of differentiating intensities depending on states does not violate the requirements of stationarity, ordinariness, and the absence of aftereffect

of event flows.

The essence of the method is to determine the preference of options based on the results of a consistent analysis of their fundamental properties. At the first stage, compliance with the necessary conditions for the effectiveness of group application is determined. For comparison, it is proposed to use the condition format, which takes into account the possibility of differentiating the intensities of event flows depending on the states. At the second stage, the limiting probabilities of the implementation options under consideration are analyzed. At the third stage, the most probable resource costs necessary to fulfill the assigned combat missions are compared. The absolute quantitative values, but not the cost of resources, are considered as a comparison basis. If it is impossible to determine the preference at the previous stages, at the fourth stage the options are compared according to the proposed integral convolution criteria. To ensure the objectivity of the choice, the probability of determining the weight coefficients of the convolution criteria is considered not only by known expert methods, but also using artificial neural networks.

It is possible to take into account the widest possible range of options for implementing the group use of unmanned aerial vehicles due to absence of the need to be tied to specific flight-technical, design, dynamic features of vehicles, the specifics of application and control schemes. There is only one fundamental requirement. It is the Markov conditions for the event flows of the system "a group of unmanned aerial vehicles – enemy air defense system – the aim of application".

This feature of the proposed method makes it possible to select an implementation option from the standpoint of the most general, fundamental properties of the designed systems for the group use of unmanned aerial vehicles as elements of high-precision weapon systems.

Key words: a group use of unmanned aerial vehicles, a group of unmanned aerial vehicles, an implementation option of group use of unmanned aerial vehicles, unmanned aerial vehicles, probability, probability of fulfilling the assigned combat mission, an intensity of event flow, an intensity of unmanned aerial vehicles loss, an intensity of unmanned aerial vehicles influx, an opposition, a system, enemy air defense system.

References

- 1. DARPA**, Dynetics move Gremlins focus to aerial recovery at <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/darpa-dynetics-move-gremlins-focus-to-aerial-recovery>.
- Air Defence Systems** at https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/air_defence_systems/index.php.
- RYAN BOETEL** Animated Air Force video shows downing of drones at https://www.stripes.com/branches/air_force/2021-06-09/Animated-Air-Force-video-shows-downing-of-drones-1663512.html.
- Artyushin L.M., Solov'ev V.I.** Performance monitoring for joint operation by a group of moving objects / *Kibernetika i Vychislitel'naya Tekhnika*, 1987, 3, p. 67-70.
- Artyushin L.M.** Problems of controlling the configuration of a mechanical system / *Soviet Applied Mechanics*, 1987, 23(2), p. 185-190.
- Artyushin L.M.** Search for optimal laws of variation of the control forces in dynamical system control problems / *Soviet Applied Mechanics*, 1988, 24(3), p. 295-300.
- Artyushin L.M., Malysenko S.V.** Features of taking the constraints on control actions into account when solving optimization problems by the inverse dynamics problems method / *Journal of automation and information science*, 1996, 28(3), p. 24-27.
- Kozlovski K.R.** (2009), *Robot Motion and Control*: monograph, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 462p.
- Asama H., Fukuda T., Arai T., Endo I.** (1996), *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*: monograph, Springer Japan, 442p.
- Tsourdos A., White B., Shanmugavel M.** (2011), *Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles*: monograph, John Wiley & Sons, 187p.
- Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.** (2009), *Collective control models and algorithms in groups of robots*: monograph. [Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov], FIZMATLIT, Moscow, 280p.
- Abrosimov V.K.** (2017). *Group movement of intelligent aircraft in an antagonistic environment*: monograph. [Gruppovoye dvizheniye intellektual'nykh letatel'nykh apparatov v antagonisticheskoy srede], Litres, Moscow, 413p.
- Moiseyev V.S.** (2017). *Group use of unmanned aerial vehicles*: monograph. [Gruppovoye primeneniye bespilotnykh letatel'nykh apparatov], Publishing centre "Shkola", Kazan, 572p.
- Artyushin L.M., Herasymenko V.V., Koval V.V.** The method of a joint aviation group forming / *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, Kyiv, 2021. - №1(40). – p. 63-68.
- Artyushin L.M., Kononov A.A., Shmorgun U.V.** Basic conditions for making decision on the creation of an automated control system for group application of unmanned aerial vehicles / *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, Kyiv, 2019. - №2(35). – C. 49-54.