

Літальні апарати: аеродинаміка, силові установки, обладнання та озброєння

УДК 004.942:629.735.33-519:629.7.076.46(045)

Д.І. Бондарєв, Д.П. Кучеров, Т.Ф. Шмельова

Національний авіаційний університет, Київ

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ГРУПОВОГО ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті аналізуються критерії ефективності для виконання завдань польоту групи БПЛА і застосування теорії графів для кількісної оцінки ефективності групового польоту БПЛА. Розроблено оптимізацію групових операцій БПЛА в залежності від цільового призначення, наприклад, фото / відео моніторингу площі місцевості. Було розраховано критерії ефективності групового польоту для всіх типів з'єднань БПЛА (повнозв'язна, зірка, кільце, дерево, загальна шина, чарункова, змішана).

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, ефективність, надійність, живучість топологій.*

Вступ

Групове використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) широко застосовується в світі для рішення народногосподарських та військових завдань. Серед цих завдань – контроль за станом великих лісових господарств з метою запобігання пожеж та повені з метою прийняття відповідних заходів щодо своєчасного гасіння пожеж та рятування постраждалих, моніторинг безпеки на автотрасах, повітряне супроводження вантажів, пошуково-рятувальні операції, аерофоторозвідка та інші. Застосування групових дій дистанційно-пілотованих апаратів дозволяє своєчасно приймати рішення та скоротити час на виконання завдання чи виконати його з більш високою якістю.

В ході застосування літальних апаратів існують такі типи групової побудови: «клин», «пеленг», «кільватер» та змішана будова. Зазначені структури характеризуються певними геометричними параметрами дистанції, інтервалів та перевищеннями, які підтримуються встановленим обладнанням з метою забезпечення безпеки польоту. Варіант побудови групового польоту БПЛА визначається конкретним завданням, що покладається на групу. Важливою складовою виконання групових польотів БПЛА є наявність зв'язного та обчислювального обладнання, яка дозволяє стверджувати, що група БПЛА являє собою деяку інформаційну мережу, елементи якої обмінюються між собою інформацією.

Структура інформаційної системи визначається її топологією. Найбільш відомими топологіями є повнозв'язна, зірка, кільце, дерево, загальна шина, чарункова, змішана. Аналіз згаданих топологій з точки зору надійності та ефективності можна знайти в літературі з комп'ютерної тематики [1 – 3]. Слід

зазначити, що аналіз топології традиційно враховує статичність структури, що не завжди виправдано з точки зору рухомих засобів та працездатності окремих елементів групи. Роботу безпроводної мережі супроводжують несправності, виходи з ладу вузлів. Тому актуальним завданням є оптимізація структури за певними критеріями.

Основною метою статті є аналіз найбільш ефективної організації та визначення топології інформаційної мережі, яка створюється із елементів групи БПЛА, для проведення ефективних дій при виконанні польотних завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпілотна авіація має ряд переваг, а саме: низьку вартість експлуатації, малу радіолокаційну та оптичну помітність, стійкість і гнучкість, просту і доступну технологію їх створення [1]. Безпілотні засоби можуть навіть використовуватися в тих випадках, коли використання пілотованої авіації є непрактичним, дорогим або ризикованим [1]. До 2008 року 91% усіх БПЛА створювалося у США, на даний момент майже 40% виробляється у інших країнах світу [2], в тому числі і в Україні. Спочатку БПЛА застосовувалися в основному у військових цілях: ведення військової розвідки, спостереження, виявлення, розпізнавання та супроводження об'єктів (цілей); забезпечення двосторонньої та радіорелейного зв'язку; ведення радіо- і радіотехнічної та радіоелектронної розвідки, радіоелектронної боротьби; виявлення фактів застосування хімічної, біологічної, та ядерної зброї; доставки вантажів; участі в інформаційних операціях; вирішення завдань пошуку і рятування; безпосередньої авіаційної підтримки; участі в повітряно-наступальній операції; контролю стану навколишнього середовища [3]. Серед усіх багатоцільових БПЛА військового призначення:

розвідувальних – 100%, ударних (для ведення вогню по наземним та повітряним цілям) – 39% [2].

У цивільній авіації основною перевагою застосування БПЛА є виконання завдань, що пов'язані з ризиком для людини та ефективність при вирішенні народногосподарських завдань. У деяких випадках використання одного літального апарату становиться неефективним – тоді є доцільним групове (колективне) застосування БПЛА, як у цивільній так і у військовій сфері: для ретрансляції зв'язку у тих місцях, де неможливо встановити антени покриття через складний рельєф; у сільському господарстві (групові обприскування полів); при аерофотозйомці (групова зйомка великих територій, моніторинг лісових пожеж, патрулювання територій тощо); переміщення вантажу [3]. На сьогоднішній день за даними UVS-International (провідної міжнародної асоціації безпілотних систем) БПЛА виробляють в 52 країнах світу [8]. Десятки великих підприємств і малих фірм конкурують на цьому ринку. Розширений, хоча і не повний перелік виробників і моделей доступний за посиланням на щорічний звіт цієї організації 2009/2010 UAS Yearbook. Не дивлячись на те, що запити військових відомств на БПЛА великі й різноманітні, далеко не всі виробники можуть сподіватися на отримання оборонних замовлень. У результаті, багато компаній, що мають розробки в області БПЛА, схильні звертати увагу на перспективи застосування БПЛА в цивільній і комерційній сферах. У свою чергу зацікавлені державні відомства і спецслужби, функції яких пов'язані з охороною, контролем та моніторингом об'єктів, ліквідацією пожеж, підприємства паливно-енергетичного комплексу, а також фірми, бізнес яких пов'язаний з отриманням просторових даних, також виявляють зустрічний інтерес до БПЛА [2–4]. Відзначено додаткові корисні властивості: швидша площа покриття фрагменту місцевості як наслідок більш ефективна при аерофотозйомці, ретрансляції зв'язку, сільськогосподарських роботах – якими володіє група БПЛА в порівнянні з використанням одного БПЛА [5–10].

Але, незважаючи на низку переваг існують певні недоліки, а саме: основні проблеми пов'язано з використанням повітряного простору, виділенням частотного діапазону для управління БПЛА і передачею інформації з борту на землю; відсутність оптимізації структури групи БПЛА. Для управління групою БПЛА пропонується застосовувати теорію графів, як математичний апарат для моделювання і оптимізації систем складної структури: в математиці для розв'язання складних рівнянь; у фізиці для побудови електричних схем; у будівництві для найбільш раціонального розміщення об'єктів і прокладання доріг; у біології для розв'язання задач генетики; в економіці – для пошуку рішень мінімальної вартості; в інформаційних технологіях – при визначенні ефективності топології локальних та глобальних обчислювальних мереж та інших сферах застосування [7]. У роботах

[11–13] досліджується неоднорідна група, що складається із БПЛА вертолітного й літакового типів, що має складний характер інформаційного обміну за рахунок застосування каналів керування польотом, операторського каналу, а також взаємодії автономних елементів системи між собою. При цьому відзначається складність задач у разі управління групою БПЛА, яка полягає у недоцільності застосування класичної теорії керування.

Постановка проблеми. Будемо представляти групу БПЛА інформаційною мережею з двонаправленими зв'язками між її елементами (вузлами). Вузли здатні приймати, перетворювати, передавати інформацію та обмінюватися певними даними, які дозволяють змінювати конфігурацію мережі. В якості середовища передачі інформації виступає повітря. За способом управління мережа відповідає архітектурі «клієнт-сервер». Спосіб організації зв'язку між вузлами в мережі визначає топологію мережі або так звану конфігурацію графа. В залежності від типу з'єднань вузлів розрізняють топології шина, кільце, зірка, коміркова та їх комбінації. Необхідність вибору топології мережі диктується рядом факторів, серед яких визначальними є відстань, безпека, надійність, вартість мережі та деякі інші показники, які слід розглядати в кожному окремому випадку розробки мережі.

Враховуючи обмеженість та залежність застосування групи БПЛА від цільового призначення ставиться завдання щодо аналізу показників топології мереж для реалізації групового польоту. Аналіз існуючих топологій інформаційних мереж та їх можливостей відповідно до табл. 1, показує переваги гібридних над класичними варіантами такими, як «шина», «кільце» та «зірка».

Основні критерії виконання польотів літальних апаратів

Основними критеріями виконання польотів літальних апаратів (ЛА) є забезпечення безпеки, регулярності, економічності та ефективності повітряного руху (рис. 1) [18]. Економічність – вартість в авіаційній експлуатації. Під цим розуміється зниження вартості польоту внаслідок використання більш надійних двигунів, зменшення витрат палива, спрощення технологій виробництва ЛА тощо. Найбільш поширеними критеріями ефективності польотів літальних апаратів є час виконання польоту і витрати палива. Згідно з Повітряним кодексом України одним з критеріїв ефективності виконання польотів є безпека авіації. Це стан галузі цивільної авіації, за якого ризик завдання збитків людям чи майну знижується до прийнятного рівня у результаті безперервного процесу визначення рівня небезпеки і керування ним, та утримується на такому рівні або знижується далі у сферах безпеки польотів, авіаційної безпеки, охорони навколишнього природного середовища, економічної безпеки та інформаційної безпеки [19].

Аналіз використання топологій мереж

Мережа	Розгортання	Надійність	Доставка пакетів	Схема доступу
Шина 	Просте розгортання, (до 10 вузлів)	Низька надійність	Одночасна доставка	Конкурентний доступ
Кільце 	Просте розгортання	Низька надійність	Одночасна доставка	Маркерний доступ
Зірка 	Необхідність концентратора при розгортанні	Критичний елемент, концентратор	Доставка із затримками	Адресний доступ
Коміркова 	Необхідність додаткового обладнання	Висока надійність	Адресна доставка	Адресний доступ
Шина – зірка 	Потребує додаткового обладнання	Висока надійність	Потребує розподілу трафіку	Конкурентність по шині, адресність по зірці
Зірка – кільце 	Необхідність додаткового обладнання	Залежність від концентратора	Потребує розподілу трафіку	Рівний доступ за рахунок маркерів
Гібридна-коміркова 	Потребує додаткового обладнання	Нижче ніж просто коміркова	Потребує розподілу трафіку	Необхідність адресації

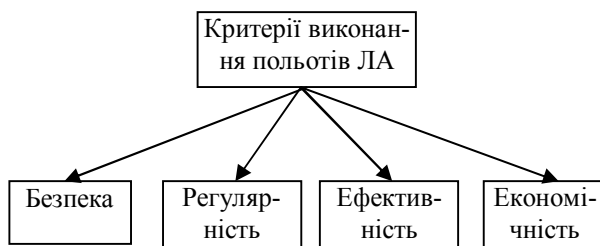


Рис. 1. Основні критерії виконання польотів ЛА

До польотів БПЛА використовуються вищезазначені критерії. Крім того, при виконанні групових польотів БПЛА доцільно застосовувати специфічні критерії надійності групової структури: зв'язність, структурна надлишковість, нерівномірність розподілу зв'язків, структурна компактність, ступінь централізації в системі, живучість [9].

Для кількісного оцінювання надійності виконання групового польоту БПЛА за вищезазначеними критеріями необхідно представити груповий політ у вигляді графу [5, 6]. Розглянемо політ групи з п'яти БПЛА, що виконують завдання аерофотозйомки фрагменту місцевості (рис. 2). Представимо груповий політ БПЛА у вигляді неорієнтованого графа $G(n; m)$, який має n вузлів (БПЛА) і m дуг (з'єднання), як показано на рис. 3. Повнозв'язна топологія буде характеризувати ефективність групового завдання БПЛА [5, 6].

В табл. 2 представлено позначення показників надійності групової структури для виконання польо-

тів БПЛА. Надійність групового польоту БПЛА визначаємо за допомогою критеріїв теорії графів [8].

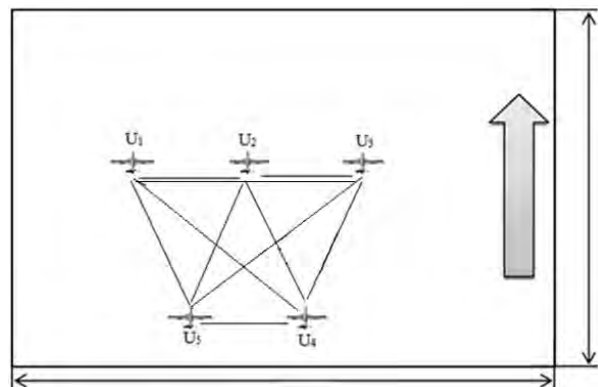


Рис. 2. Схема групових польотів БПЛА \ при аерофотозйомці фрагменту місцевості топологічно повнозв'язних.

Таблиця 2

Показники надійності групової структури

№	Показники надійності	Символ
1	Зв'язність графа	L
2	Структурна надлишковість	R
3	Нерівномірність розподілу зв'язків	ε^2
4	Структурна компактність	D
5	Ступінь централізації в системі	δ
6	Живучість	K

Представимо групу БПЛА з використанням матриці суміжності (табл. 3) та розрахуємо критерії ефективності топології структур групи БПЛА.

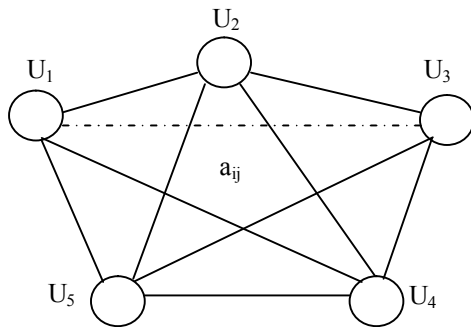


Рис. 3. Представлення групи БПЛА у вигляді неорієнтованого графа з п'яти елементів повнозв'язної мережі

Таблиця 3

Матриця суміжності $A = \|a_{ij}\|$

Вершина графа $G(m, n)$	Вершина графа $G(m, n)$					
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$\sum_j U_{ij}$
U_1	0	1	1	1	1	4
U_2	1	0	1	1	1	4
U_3	1	1	0	1	1	4
U_4	1	1	1	0	1	4
U_5	1	1	1	1	0	4
$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m U_{ij}$						20

Зв'язність відповідає наступним умовам:

$$L \geq L_{\min};$$

$$L_{\min} = n - 1 = 4;$$

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m U_{ij} \geq n - 1 = 9,$$

де L_{\min} – необхідна мінімальна кількість зв'язків неорієнтованого графа з n вершинами; $n = 5$; $m = 10$; U_{ij} – вершини і дуги графа $G(n; m)$.

Так, як нерівність дотримується ($9 > 4$), то граф $G(n; m)$ являється зв'язним.

Визначення структурної надлишковості R – перевищення загальної кількості зв'язків над мінімально необхідною. Мережа з великою надмірністю R потенційно більш надійна:

$$R = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m U_{ij} \right] \frac{1}{n-1} - 1 = 1,5,$$

де U_{ij} – вершини і дуги графа $G(n; m)$; n – кількість БПЛА в групі.

При $R > 0$ – максимальна надлишковість,

$R = 0$ – мінімальна надлишковість,

$R < 0$ – система незв'язна [7].

У нашому випадку система зв'язна і має максимальну надлишковість: $R = 1,5 > 0$.

Нерівномірність розподілу зв'язків ϵ^2 характеризує невикористання можливостей структури, що має m ребер і n вершин в досягненні максимальної зв'язності:

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2 = \sum_{i=1}^n \rho_i^2 - 4 \frac{m^2}{n} = 0,$$

де $\rho = \|\rho_{ij}\|$ – елемент матриці інцидентій (табл. 4);

n – кількість вершин у структурі повнозв'язної топології групи БПЛА; m – кількість дуг у структурі повнозв'язної топології групи БПЛА.

Таблиця 4

Матриця інцидентій $\rho = \|\rho_{ij}\|$

Вершина графа $i = \overline{1, n}$	Ребро графа, $j = \overline{1, m}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
U_2	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
U_3	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
U_4	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0
U_5	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

За допомогою даних матриці інцидентій, маємо нерівномірність розподілу зв'язків $\epsilon^2 = 0$, тобто повнозв'язна структура має рівномірний розподіл зв'язків.

Структурна компактність вказує на близькість параметрів між собою через мінімальну довжину ланцюга:

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij},$$

де d_{ij} – відстань між вершинами графа $G(n; m)$ групи БПЛА.

Складаємо матрицю відстаней (табл. 5), елемент якої d_{ij} визначається як мінімальна відстань між вузлами.

Таблиця 5

Матриця відстаней $D = \|d_{ij}\|$

Вершина графа $G(m, n)$	Вершина графа $G(m, n)$					
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	$\sum_{j=1}^n d_{ij}$
U_1	0	1	2	2	1	6
U_2	1	0	1	2	2	6
U_3	2	1	0	1	2	6
U_4	2	2	1	0	1	6
U_5	1	2	2	1	0	6

Структурну компактність характеризує показник – діаметр структури d :

$$d = \max d_{ij} = 2,$$

де d_{ij} – відстань між вершинами графа.

Величини $D_{\text{від}}$ і d інтегрально характеризують інерційність процесів в системі, при рівних значеннях ε^2 і R їх збільшення відображає зростання кількості зв'язків, які роз'єднують. Така ситуація сприяє зниженню надійності системи в цілому. Загальна близькість розташування БПЛА у групі:

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} = 30.$$

Відносний показник $D_{\text{від}}$:

$$D_{\text{від}} = \frac{D}{D_{\text{min}}} - 1 = 0,5; \quad D_{\text{min}} = n(n-1) = 20.$$

Ступінь централізації в системі визначається за допомогою індексу центральності, обчислюваного для групи БПЛА за формулою:

$$\delta = (n-1)(2Z_{\text{max}} - n) \frac{1}{Z_{\text{max}}(n-2)} = 0,$$

де Z_{max} – максимальне значення показника Z_i ; Z_i – індекс централізації конкретного БПЛА в групі; n – кількість БПЛА в групі.

Для оцінки ступеня нерівномірності (C_i) елементів групової структури, і ступеня централізації системи використовується поняття центральності окремих її елементів C_i , що розраховується за формулою:

$$C_i = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij}}{\sum_{j=1}^m d_{ij}};$$

$$C_{\text{max}} = 5,$$

де d_{ij} – мінімальна відстань між вершинами графа $G(n; m)$ групової структури БПЛА; C_{max} максимальна центральність у будь якого з вузлів.

Відносна периферійність вузла:

$$P_i = C_{\text{max}} - C_i = 0.$$

Живучість мережі – кількість станів, при яких мережа зберігає працездатність. Живучість може розглядатися як найбільш об'єктивний і адекватний показник, який дозволяє найкраще оцінити всі аспекти структурно-функціональної надійності мереж, яке знаходиться у зовнішньому середовищі, що постійно змінюється, і піддається перманентним модернізаціям з метою поліпшення показників якості її функціонування [9].

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n U_i - 2(n-1)}{2(n-1)} = 2,125,$$

$K > 0$, при втраті хоча б одного зв'язку структура зберігає працездатність.

За допомогою теорії графів ми можемо визначити ефективність при різних типах вишикування групових структур БПЛА (повнозв'язну, зіркоподібну, кільцеву, деревоподібну, загальну шину, змішану, чарункову). Від типу вишикування (структури групи БПЛА), за якою виконується політ групи літаків залежить ефективність виконання задачі.

Було розраховано кількісні значення ефективності групових польотів для різних видів зв'язків в групі БПЛА (табл. 6, рис. 4).

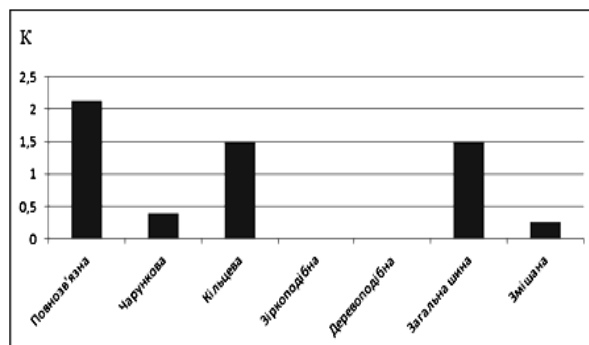


Рис. 4. Графічне представлення кількісних значень ефективності польотів групи БПЛА за критерієм живучості

Таблиця 6

Оцінювання ефективності групових польотів БПЛА для різних топологій

Схема	Зв'язність	Оцінки							
		R	ε^2	D	$D_{\text{від}}$	d	δ	П	K
Повнозв'язна топологія	+	1,5	0	30	0,5	2	0	0	2,125
Чарункова топологія	+	0,4	47,3	68	1,26	3	0,23	4,63	0,4
Кільцева топологія	+	2,5	105	50	1,5	4	0	0	1,5
Зіркоподібна топологія	-	0	13,3	50	0,6	2	1	22,5	0
Деревоподібна топологія	-	0	5,42	96	1,28	4	0,0325	4,38	0
Загальна шина	+	2,5	-23,8	80	3	6	0,33	3,3	1,5
Змішана топологія	+	1,26	-9,14	755	3,14	9	0,67	101,98	0,26

Висновки

Таким чином, при створенні топології груп БПЛА доцільно орієнтуватись на повнозв'язну топо-

логію, як на найбільш ефективну. Подальші дослідження слід направити на розв'язок практичних завдань реалізації групового управління при керуванні БПЛА, що призводить до підвищення ефекти-

ності використання БПЛА, а саме: можливість коригування плану та оптимізації маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА; збільшення вірогідності успішності виконання задачі; значний виґраш у часі; можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу; можливість постановки різних завдань для багатокомпонентних учасників групи БПЛА з урахуванням ефективності топології груп.

Список літератури

1. Кузин А.В. Компьютерные сети / А.В. Кузин. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2011. – 192 с.
2. Максимов Н.В. Компьютерные сети / Н.В. Максимов, И.В. Попов. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 448 с.
3. Олифер В.Г. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2006. – 958 с.
4. Reg Austin, *Unmanned aircraft systems : UAVS design, development and deployment / 2010 John Wiley & Sons Ltd.*
5. Sara Kreps, "The Next Drone Wars"/ Sara Kreps, Micah Zenko// "Foreign Affairs" 2014. Режим доступу: <http://bmpd.livejournal.com/861105.html>.
6. Игнатьев О. БЛА: Состояние и перспективы их использования в интересах НАТО (2010) // Зарубежное военное обозрение. – 2010. – №12. – С. 45-52. – Режим доступу: http://factmil.com/publ/strana/nato/bla_sostojanie_i_perspektivy_ikh_ispolzovaniya_v_interesakh_nato_2010/61-1-0-256.
7. Зинченко О.Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования / О.Н. Зинченко, «Ракурс», Москва.
8. UVS International, RPAS: The Global Perspective / 14th Annual Edition of the International Remotely Piloted Aircraft Systems Yearbook // UVS International, 2016, Режим доступу <http://uvs-international.org/>.
9. Бондарев Д.И. «Эффективность групповых полетов беспилотных летательных аппаратов» наукова стаття / Д.И. Бондарев, Р.Т. Джафарзаде, А.М. Козуб // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 6. – С. 4-13.
10. Бондарев Д.И. Модели групповых полетов беспилотных летательных аппаратов с использованием теории графов / Д.И. Бондарев, Т.Ф. Шмельова, Д.П. Кучеров // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 6. – С. 3-12.

11. Олифер Ю. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы: учебн. для вузов. – Питер, 2010. – 944 с.

12. Сизова О.А. Применение теории графов в различных видах научной деятельности / О.А. Сизова. – Баку, 2012 – 5 с.

13. Чекунов Е. «Применение БПЛА ВС США в военных конфликтах» наукова стаття / Е. Чекунов // Зарубежное военное обозрение. – М., 2010. – № 7. – С. 41-50.

14. Ганин С.М. Беспилотные летательные аппараты / С.М. Ганин, А.В. Карпенко // Санкт-Петербург, 1999. – 160 с.

15. Исканцев Н.В., Теория множеств: понятие и виды отображений. – М., 2012. – 148 с.

16. Бондаренко Д.Л. Повышение структурной живучести Информационно-вычислительных комплексов путем оптимального пространственного разнесения элементов / Д.Л. Бондаренко // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический жс. – 2011. – Т. 10, Вып. 4. – Режим доступу: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/TITL.HTM>.

17. Амелин К.С. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов / Е.И. Антал, В.И. Васильев, Н.О. Граничина // Санкт-Петербургский Государственный Университет 2013 – 10 с.

18. Степанян К.В. Планирование траектории БПЛА в сложных условиях при наличии угроз / К.В. Степанян, А.Б. Миллер, Б.М. Миллер // Мат-лы 33-й конф. молодых ученых и специалистов ИППИ РАН «Информационные технологии и системы» (ИТИС"10) 20-24 сентября 2010, Россия, Геленджик, с.263-268. [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <http://www.itas2010.ittp.ru/pdf/1569326822903.pdf>.

19. Brooks R.A. A robust layered control system for air-mobile robot / Brooks R.A. // IEEE Journal Robotics and Automation. – № 2(1). – 1986. – P. 14-23.

20. Montgomery J.F. Learning helicopter control through "teaching by showing" / Montgomery J.F., Bekey G.A. // IEEE Conference on decision and Control, 1998.

21. Annex 17 Chicago convention ICAO, Monreal 2011.

22. Повітряний кодекс України / Верховна Рада України. – 2011 – 534 с.

Надійшла до редколегії 29.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, доц. М.А. Павленко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУППОВЫХ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ ТЕОРИИ ГРАФОВ

Д.И. Бондарев, Д.П. Кучеров, Т.Ф. Шмельова

В статье проведен анализ критериев эффективности для выполнения задач групповых полетов, рассматривается применение теории графов для определения эффективности групповых полетов БПЛА, виды групповых полетов. Статья демонстрирует определение критериев эффективности и надежности групповых полетов беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, эффективность, надежность, живучесть топологий.

MODELLING OF GROUP FLIGHTS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES USING GRAPH THEORY

D.I. Bondarev, D.P. Kucherov, T.F. Shmelova

The article analyzes the performance criteria for the performance of tasks of group flight, the application of graph theory to determine the effectiveness of group flight UAV types of group flights. The article shows the determining criteria of efficiency and reliability of group flight of unmanned aircraft.

Keywords: unmanned aerial vehicles, efficiency, reliability and survivability topologies.