

УДК 004.942:519.876.5

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

Національний авіаційний університет, Київ

## МОДЕЛІ ГРУПОВИХ ПОЛЬОТІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

У статті проведено аналіз, систематизацію і кодування типів безпілотних літальних апаратів за існуючими класифікаціями. Введено показники ефективності групового польоту у вигляді часу, площі та щільності покриття. Виконаний порівняльний аналіз ефективності застосування літальних апаратів за цільовим призначенням. Побудовано матриці суміжності, інцидентів, відстаней для повнозв'язної структури групи літальних апаратів. Визначено доцільність застосування сучасних мережевих технологій для аналізу топології групи літаків.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, класифікація, цільове призначення, теорія графів, матриці суміжності, інцидентів, відстаней, топологія.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Останнім часом стрімкого розвитку отримує безпілотна авіація. Розроблення безпілотних авіаційних комплексів (БАК) на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) проводиться в цей час фактично всіма індустріально розвиненими країнами світу. Донедавна БПЛА мали військове призначення, наразі застосування БАК ефективно як у військових завданнях, так і завданнях цивільного призначення, наприклад, при боротьбі з наслідками надзвичайних ситуацій, стихійними лихами, сільськогосподарського застосування, для розвідки і аерофотозйомки [1].

Безпілотна авіація має ряд переваг, а саме: низька вартість експлуатації, добре приховування, стійкість і гнучкість, простота і доступність технології в порівнянні з пілотованими повітряними судами, також БПЛА може використовуватися в тих випадках, коли використання пілотованої авіації є непрактичним, дорогим або ризикованим [1; 2]. Очевидно, що ефективність групових польотів БПЛА при моніторингу лісових пожеж, пошуково-рятувальних операціях, у сільському господарстві при обробці сільськогосподарських культур, ретрансляція зв'язку та переміщення вантажу значно вище, ніж при одиничних польотах БПЛА.

До недоліків безпілотної авіації можна віднести обмежені можливості за рахунок невеликих розмірів БПЛА, що може бути скомпенсоване використанням групових польотів [2]. Крім того, у групи невеликих і легких БПЛА, що ефективно взаємодіють, виявляються додаткові корисні якості: швидкість виконання завдання, збільшення щільності площі покриття при обприскуванні сільськогосподарських культур, тощо.

Для управління групою БПЛА доцільно застосувати 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 інші сфери застосування.

Розглянемо задачу застосування групового польоту БПЛА на прикладі аерофотозйомки. Пропонується побудувати систему із  $n$  БПЛА, цілями якої є максимальне перекриття території для отримання картографічної інформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Детальному аналізу, класифікації, цільовому призначенню, як у військовому, так і цивільному сегменті, сучасним розробкам, дизайну, еволюції безпілотних авіаційних систем (БАС) присвячено працю [1]. У статті [3] наведено міжнародну класифікацію БПЛА, проведено аналіз БПЛА іноземного виробництва (Unmanned Aerial Vehicles, UAV), зокрема при застосуванні в лісовому секторі.

Основною перевагою застосування БПЛА є виконання завдань, що пов'язані з ризиком для людини та ефективність при вирішенні народногосподарських завдань. В цьому сенсі застосування групи БПЛА є ще більш доцільним: 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. Вочевидь є застосування групи БПЛА у військових цілях.

Американський експерт, Джон Уорден пророкує, що до 2025 року близько 90% літаків будуть

безпілотними, і тільки 10% - пілотованими, а пілоти будуть "золотим запасом" для найбільш важливих і важких завдань [20]. Аналогічна ситуація спостерігається і в зв'язку з розвитком БАС для використання у цивільних цілях. Це пов'язано з низкою важливих переваг. Перш за все, відсутність екіпажу на борту повітряного судна (ПС), і, таким чином усуваючи ризик смерті. Можливість виконувати маневри з великими перевантаженнями перевищує фізичні можливості пілота, велику довжину і діапазон у відсутності екіпажу фактор втрати. І, нарешті, відносно невелика вартість безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які можуть мати невеликі розміри і низька вартість експлуатації. [20].

Більшість робіт, у яких вивчаються групові дії БПЛА, орієнтовані на основну монографію [4], у якій з використанням підходів класичної теорії керування розглядаються питання керування групою, організованою у вигляді «строю», що припускає роздільне подання руху окремого об'єкта групи математичною моделлю для бічного й поздовжнього руху центру мас. При цьому виникає завдання розробки деякого «оптимального» маршруту для групи БПЛА. Ряд дослідницьких робіт присвячується рішенню завдання планування маршруту як одного БПЛА, так і всієї групи БПЛА [5; 6].

Відзначено додаткові корисні властивості, якіми володіє група БПЛА в порівнянні з використовуваним одним БПЛА [2].

У роботах [7-10], 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 [11-13].

Для моделювання груп об'єктів широко використовується теорія графів у інформаційних технологіях (наприклад, підключення комп'ютерів у мережу), за допомогою різних видів топологій. Для моделювання збільшення ефективності групових польотів безпілотних літальних апаратів пропонується використовувати теорію графів.

**Метою статті є:** моделювання групового польоту БПЛА для аерофотозйомки за допомогою теорії графів. Виконання мети потребує вирішення таких завдань: порівняльний аналіз ефективності застосування групових польотів БПЛА за цільовим призначенням; систематизація та кодування БПЛА за існуючими класифікаціями; моделювання групового польоту БПЛА для аерофотозйомки за допомогою теорії графів та визначення топології системи зв'язаних БПЛА.

## Основний матеріал

Порівняльний аналіз застосування групових польотів БПЛА за цільовим призначенням. Для визначення ефективності виконання цільової задачі групою БПЛА було проведено порівняльний аналіз застосування групових польотів БПЛА за цільовим призначенням. Безпілотні літальні апарати, як і пілотовані, бувають літакового, а також вертолітного (мультикоптерного) типу (вертольоти і мультикоптери - літальні апарати з чотирма і більше роторами з несучими гвинтами), а також з махаючим крилом [22].

На практиці БПЛА літакового типу, як правило, застосовуються для аерофотозйомки вагою до 10–15 кілограмів (мікро-, міні- БПЛА і легкі БПЛА), що пов'язано з тим, що зі збільшенням злітної ваги БПЛА зростає складність його розробки і, відповідно, вартість, але знижується надійність і безпечність експлуатації [20]. Чим більше маса апарату, тим більше його посадкова швидкість, тобто енергія, яка виділяється при посадці БПЛА дуже швидко росте із зростанням маси апарату і може пошкодити сам БПЛА.

Перевагою безпілотного вертоліту і мультикоптеру є здатність здійснити посадку з малою швидкістю. Однак безпілотні вертольоти занадто дорогі, а мультикоптери поки не здатні літати на великі відстані, і застосовуються тільки для зйомки локальних об'єктів (окремих будівель і споруд) [22].

Безпілотний літальний апарат з махаючим крилом поєднує в собі БПЛА літакового та мультикоптерного типу, а саме: здатність здійснювати політ у прямолінійній площині, та призупинити політ над певним об'єктом, крім того перевагами такої схеми польоту є невеликі розміри апарату [20]. Основним недоліком БПЛА з махаючим крилом вважається: коротка тривалість польоту, мала площа досліджуваної поверхні (якщо мова йде про аерофотозйомку), неможливість переміщення вантажу, та використання у сільському господарстві [20].

Застосуванням групи БПЛА можна мінімізувати вищеперераховані недоліки. В табл. 1 наданий порівняльний аналіз ефективності застосування різних типів БПЛА в груповому польоті при виконанні таких задач:

1. Аерофотозйомка.
2. Ретрансляція зв'язку.
3. Сільськогосподарські роботи.
4. Переміщення вантажу.
5. Пошуково-рятувальні роботи.

Таким чином, аерофотозйомку, пошуково-рятувальні роботи можуть здійснюватися всіма типами БПЛА, але для пошуково-рятувальних робіт перевагу матимуть ті, що зможуть залишатися над одним місцем протягом тривалого часу, тобто мультикоптери.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз типів БПЛА за цільовим призначенням

Цільове призначення БПЛА	Типи БПЛА за призначенням		
	Літаки	Мультикоптери	БПЛА з махаючим крилом
Аерофотозйомка	+	+	+
Сільське господарство	+	+	-
Ретрансляція зв'язку	+	+	+
Переміщення вантажу	+	+	-
Пошуково-рятувальні роботи	+	+	+

При переміщенні вантажу найбільш ефективними є БПЛА літакового типу, так само як і при сільськогосподарських роботах і ретрансляції зв'язку [5]. Для проведення робіт з аерофотозйомки перевагою БПЛА перед пілотованими повітряними суднами є насамперед, вартість, значне зменшення кількості регламентних операцій, а відсутність людини на борту літака значно спрощує підготовчі заходи [20].

**Аналіз, систематизація і кодування БПЛА за класифікаціями.** Існують такі класифікації БПЛА [20]:

- за цільовим призначенням;
- по злітній масі;
- по дальності польоту;
- по висоті польоту;
- за тривалістю польоту;
- за типом конструкції і силової установки та інші.

За типом конструкції БПЛА поділяються на апарати, що виконані з літакової (fixed - wing) і вертолітним (rotary - wing) схемам, а також апарати з махаючим крилом [22]. За типом зльоту БПЛА поділяються на апарати зі зльотом із злітно-посадкової смуги та із вертикальним зльотом (як правило використовуються в залежності від цільового призначення) [20]. Безпілотні літальні апарати класифікують за способом зльоту і посадки: аеродромного і безаеродромного, тобто зліт з злітно-посадкової смуги (ЗПС) або за допомогою катапульт; посадка на ЗПС або на парашуті чи за допомогою тенет [20].

За цільовим призначенням, БПЛА класифікують як сільськогосподарські, спостереження, пошуково-рятувальні, вантажні та ретранслятори зв'язку. Останнім часом сфера застосування безпілотних апаратів значно поширюється: торгівельні операції, лісівництво та риболовля, та інші. За кількістю застосувань класифікують як: одноразового та багаторазового застосування. Як правило такі БПЛА застосовуються при моніторингу лісових пожеж, та пошуково-рятувальних роботах, де існує велика вірогідність втрати літального апарату [22]. За тривалістю польоту БПЛА класифікують: на літальні апарати короткострокового польоту (до 1 години), середньострокового польоту (від 1 до 6 годин), дост-

рокового польоту (від 6 годин) [20]. Враховуючи досить велике різноманіття БПЛА їх також класифікують за вагою.

- мікро до 1 кг.,
- малі 1 – 100 кг.,
- легкі 100 – 500 кг.,
- середні 500 – 5000 кг.,
- важкі 5000 – 15000 кг.,
- надважкі 15000 кг і більше.

Усі вищезазвані типи БПЛА за вагою класифікуються в залежності від дальності польоту та максимальної злітної маси [20]. В таблиці 2 приведено аналіз, систематизацію і кодування типів БПЛА за існуючими класифікаціями.

Моделювання групового польоту БПЛА для аерофотозйомки. Нехай маємо  $k$  апаратів (класу А, В, С, D, E, F, G – табл. 2), що оснащені апаратурою для проведення аерофотозйомки. Умовами фотозйомки є координати польоту літака:  $h$  - висота та  $v$  - швидкість руху. Апаратура відео/фотозйомки має такі показники:  $\Delta\alpha$  – повздовжнього, та  $\Delta\beta$  – поперечного полів зору.

Елементарна ділянка  $s$  площини  $S$  при миттєвому перегляді

$$s = h^2 \Delta\alpha \Delta\beta. \quad (1)$$

Передбачаючи прямокутну форму площини  $S$  та в кожний розмір прямокутника повністю вкладаються  $m$  та  $n$  повних повздовжніх  $\Delta\alpha$  та поперечних  $\Delta\beta$  полів зору можна отримати повздовжній  $A$  та поперечний  $B$  розміри площини  $S$

$$A = mh\Delta\alpha, \quad B = nh\Delta\beta. \quad (2)$$

З метою проведення фотозйомки площиною  $S$  одинокий літак вимушений рухатися по траєкторії типу «змійка». Тоді рухи літака розкладаються на ділянки прямолінійного та криволінійного шляхів, останній виконується для організації розвороту. Загально витрачений час складається з двох типів часу, які витрачається на долання  $m$  прямолінійних та  $n$  криволінійних ділянок

$$T = T_1 + T_2 = mt_1 + nt_2, \quad (3)$$

де  $t_1$  та  $t_2$  – час, що витрачається на одну прямолінійну та криволінійну ділянки відповідно.

Класифікація типів БПЛА

№	Клас	Класифікація	Підклас	Кодування
1	А	Класифікація БПЛА за призначенням	БПЛА для аеро / фотозйомки	A <sub>1</sub>
			Сільськогосподарські БПЛА	A <sub>2</sub>
			БПЛА ретранслятори зв'язку	A <sub>3</sub>
			...	A <sub>n</sub>
2	В	Класифікація БПЛА за тривалістю польоту	Короткострокові БПЛА (менше 1 години)	B <sub>1</sub>
			Середньострокові БПЛА (1 – 6 годин)	B <sub>2</sub>
			Довгострокові БПЛА (більше 6 годин)	B <sub>3</sub>
			...	B <sub>n</sub>
3	С	Класифікація БПЛА за ваговими категоріями	Мікро БПЛА (до 1 кг)	C <sub>1</sub>
			Малі БПЛА (1 – 100 кг)	C <sub>2</sub>
			Легкі БПЛА (100 – 500 кг)	C <sub>3</sub>
			Середні БПЛА (500 – 5000 кг)	C <sub>4</sub>
			Важкі БПЛА (5000 – 15000 кг)	C <sub>5</sub>
			Надважкі БПЛА (більше 15000 кг)	C <sub>6</sub>
			...	C <sub>n</sub>
4	D	Класифікація БПЛА за типом літального апарату	БПЛА літакового типу	D <sub>1</sub>
			БПЛА гелікоптери	D <sub>2</sub>
			БПЛА з махаючим крилом	D <sub>3</sub>
			...	D <sub>n</sub>
5	E	БПЛА за способом запуску	БПЛА аеродромного запуску	E <sub>1</sub>
			БПЛА безаеродромного запуску за допомогою катапульти	E <sub>2</sub>
			БПЛА безаеродромного запуску з рук	E <sub>3</sub>
			...	E <sub>n</sub>
7	F	БПЛА за способом посадки	БПЛА аеродромної посадки	F <sub>1</sub>
			БПЛА безаеродромної посадки за допомогою парашуту	F <sub>2</sub>
			БПЛА безаеродромної посадки за допомогою тенет	F <sub>3</sub>
			...	F <sub>n</sub>
8	G	БПЛА за кількістю застосувань	БПЛА одноразового застосування	G <sub>1</sub>
			БПЛА багаторазового застосування	G <sub>2</sub>
			...	G <sub>n</sub>

Зменшити час (3) в  $k$  разів можна, якщо застосувати  $k$  літальних апаратів одночасно. Розглянемо  $k$  літальних апаратів, що виконують прямолінійний рух з інтервалом  $l_{i,i+1}$  при аерофотозйомці, де  $i$  – номер апарату. Математична модель, що описує динаміку цього польоту в безперервному часі [6] системою диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \dot{l}_{1,2} &= v[\phi_1 - \beta_1 - (\phi_2 - \beta_2)] , \\ \dots \\ \dot{l}_{k-1,k} &= v[\phi_{k-1} - \beta_{k-1} - (\phi_k - \beta_k)] , \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\phi$ ,  $\beta$  – кути рискання та ковзання.

Для забезпечення паралельності руху необхідна система керування, що забезпечує задані дистанції.

Кінематична система рівнянь (4) не змінюється, якщо замість повітряної вибрати путьову швидкість.

При рішенні рівнянь (4) будемо передбачати, що знос усіх літаків відбувається в однаково.

Топологія групи літальних апаратів.

Розглянемо два варіанти вишукування групи.

Перший варіант: звичайний політ по прямолінійній траєкторії з вишукуванням в один рядок (рис. 1).

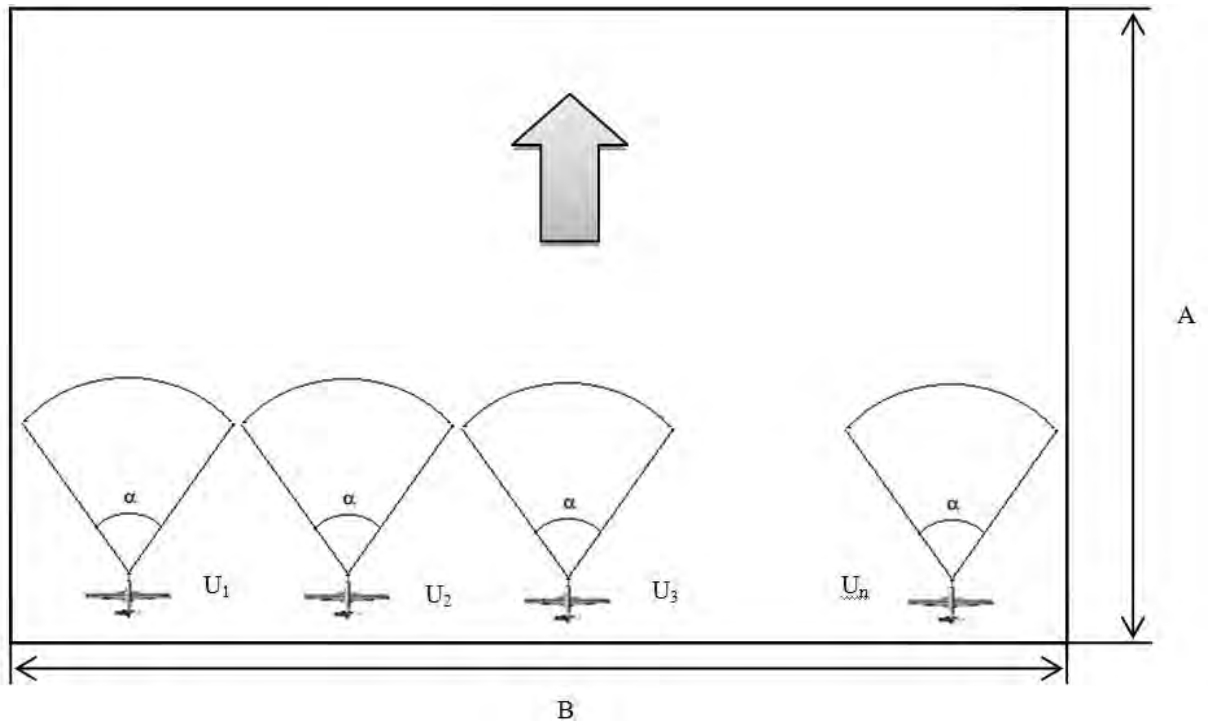


Рис. 1. Політ групи БПЛА по прямій траєкторії

У кожного БПЛА в групі існує свій кут захоплення картинка при аерофотозйомці. Тому у нашому випадку в групі усі БПЛА будуть знаходитися один від одного на певній відстані залежно від кута захоплення  $\alpha$ . Отже, задача підтримки дистанції між БПЛА буде виконуватися за час  $T$ :

$$\sum_{i=1}^n t \leq T \tag{5}$$

Розглянемо другий варіант: та сама кількість БПЛА але вишикувана у  $m$  рядів. Схема групових польотів БПЛА для нього показана на рис. 2.

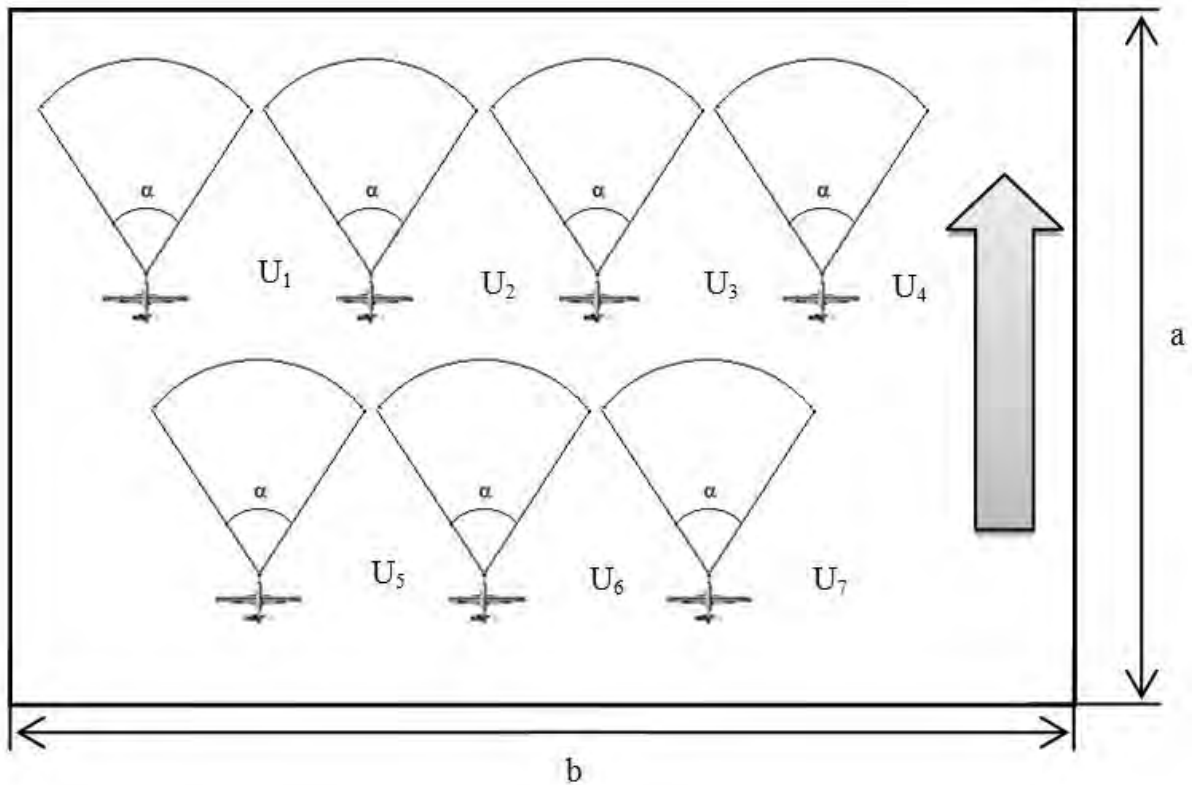


Рис. 2. Схема групових польотів БПЛА при аерофотозйомці фрагменту місцевості

При такому шикуванні групи БПЛА будуть повністю покривати площу  $S$  за менший час  $t$ , оскільки в першому варіанті не враховувалась похибка пропуску певних ділянок території між елементами групи, як показано на рис. 2.

Час виконання задачі ( $T$ ) та щільність покриття  $f$  при рівних умовах (кількість літаків ( $k$ ), площа покриття ( $S$ )) для схем (рис. 1, 2) різні. Для першого варіанту покриття щільність буде визначатися полем зору тільки двох апаратів, а для другого варіанту трьома апаратами:

$$f_2 > f_1, \quad (6)$$

де

$$f_1 = S_1 \cap S_2, \quad f_2 = S_1 \cap S_2 \cap S_3, \quad (7)$$

де  $f$  – щільність покриття,

$S_i$  – поле зору  $i$ -го апарату,  $i = 1, 2, 3$ .

Для кількісного оцінювання ефективності виконання групового польоту БПЛА за цільовим призначенням доцільно застосувати математичний апарат формалізації мережевих структур, тобто за до-

помогою теорії графів [21]. Мережева структура може мати різну конфігурацію, тобто розташування і зв'язки між вузлами мережі, найбільш поширеними з яких є:

- повнозв'язна,
- зіркоподібна,
- кільцева,
- деревоподібна,
- з загальною шиною,
- змішана,
- чарункова.

Від топології мережі, за якою виконується політ групи літаків залежить ефективність виконання задачі.

Для виконання аерофотозйомки фрагменту місцевості групою БПЛА представимо схему групового польоту БПЛА у вигляді неорієнтованого графа  $G(n; m)$ , що має  $n$  вузлів, та  $m$  дуг.

На прикладі повнозв'язної топології проведемо аналіз ефективності виконання завдання групою БПЛА (рис. 3).

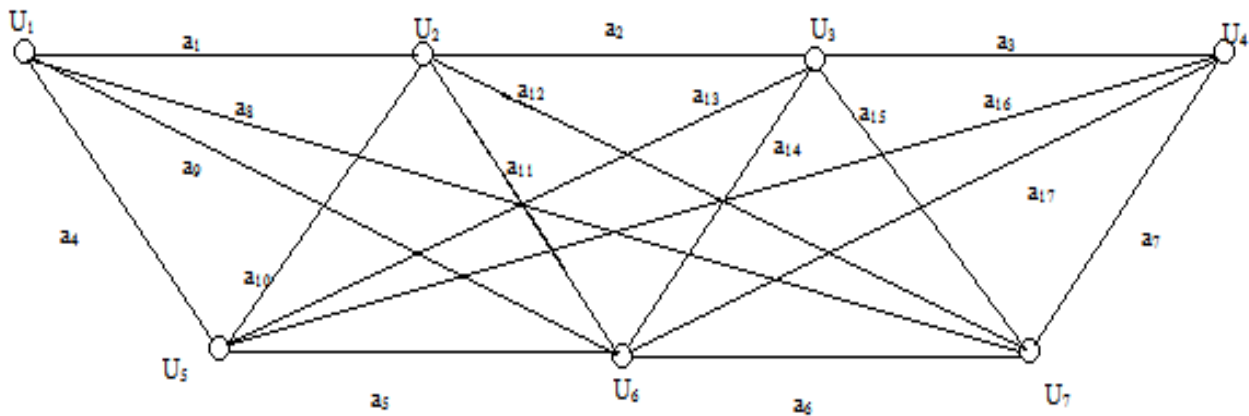


Рис. 3. Модель розташування БПЛА у вигляді графа  $G(n; m)$ , якщо  $n = 7$ ,  $m = 17$

Повнозв'язна топологія відповідає мережі, в якій кожен вузол безпосередньо пов'язаний з усіма іншими вузлами [17; 18].

Побудовані матриці:

- суміжності  $R = [r_{ij}]$ ,
- інциденцій  $S = [s_{ij}]$
- відстані  $D = [d_{ij}]$ ,

за допомогою яких пропонується визначати кількісні показники виконання групою безпілотних літальних апаратів завдань за цільовими призначеннями (табл. 1) відповідно до існуючих мережевих топологій [19].

## Висновки

Таким чином, аналіз застосування груп безпілотних літальних апаратів ЛА за цільовим призначенням дав можливість сформулювати вхідні дані для розроблення топологій зв'язної групи БПЛА (табл. 1, 2).

Для виконання аерофотозйомки фрагменту місцевості групою БПЛА найбільш ефективною виявилася повнозв'язна топологія.

Подальші дослідження слід направити на розв'язок практичних завдань реалізації групового управління при керуванні БПЛА, що призводить до підвищення ефективності 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 виграш у часі;
- можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу;
- можливість постановки різних завдань для багатокomпонентних учасників групи БПЛА з урахуванням ефективності топології груп.

## Список літератури

1. Reg Austin, *Unmanned aircraft systems : UAVS design, development and deployment* / 2010 John Wiley & Sons Ltd.
2. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов / К.С. Амелин, Е.И. Антал, В.И. Васильев, Н.О. Граничина. – СПб.: Санкт-Петербургский Государственный Университет, 2013 – 10 с.
3. Никифоров А.А. Анализ зарубежных беспилотных летательных аппаратов / А.А. Никифоров, В.А. Мунимаев. – СПб.: Санкт-Петербургская лесотехническая академия, 2010 – 3 с.
4. Фрадков А.Л. Децентрализованное адаптивное управление синхронизацией сетей динамических сетей динамических систем при ограниченных возмущениях / А.Л. Фрадков, Г.К. Григорьев // Автоматика и телемеханика. – 2013. – №5. – С. 137-155.
5. Козуб А.Н. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА / А.Н. Козуб, Д.П. Кучеров // Искусственный интеллект. – 2013. – № 4 (62). – С. 333-343.
6. Козуб А.М. Планирование маршрута БПЛА / А.М. Козуб, Д.П.Кучеров // Вісник СУНУ ім. В. Даля. – 2013. – № 5 (194). – С. 189-192.
7. Степанян К.В. Планирование траектории БПЛА в сложных условиях при наличии угроз / К.В. Степанян, А.Б. Миллер, Б.М. Миллер // Мат. 33-й конф. молодых ученых и специалистов ИППИ РАН «Информационные технологии и системы» (ИТИС'10) 20-24 сент. 2010, Россия, Геленджик. – С. 263-268. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itas2010.itp.ru/pdf/1569326822903.pdf>.
8. Brooks R.A. A robust layered control system for airmobile robot / R.A. Brooks // IEEE Journal Robotics and Automation. – 1986. – № 2(1). – P. 14-23.
9. Montgomery J.F. Learning helicopter control through “teaching by showing” / J.F.Montgomery, G.A. Bekey // IEEE Conference on decision and Control, 1998.
10. Каляев И.А. Стайные принципы управления в группе объектов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – №2. – С. 29–33.
11. Multi-Agent UAV Path Planning / L. Marsh, G. Calbert, J. Tu, D. Gossink, H. Kwok // 1 Defence Science and Technology Organization, Australia, 2005. – P. 2188-2194.
12. Капустян С.Г. Метод оптимального распределения целей в коллективе роботов / С.Г. Капустян, Л.Ж. Усачев, С.В. Стоянов // Информационные технологии. – 1998. – № 4. – С. 29–34.
13. Каляев И.А. Распределение системы планирования действий коллективов роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – М.: Янус-К, 2002. – 292 с.
14. Kuchero D.P. Modeling traffic in control problems of robotic systems / D.P. Kuchero // Proc. the Fifth world congress “Aviation in XXI-st century”, September 25-27, 2012, Vol. 1, Kyiv, 2012. – P. 1.9.18-1.9.21.
15. Козуб А.М. Алгоритм терминального управления системы третьего порядка с тремя нулевыми полюсами в условиях ограниченных помех / А.М. Козуб, Д.П. Кучеров // Тенденции развития естественных и математических наук : сб. научн. тр. – Н-ск: СибАК, 2013. – С. 31-42.
16. Бондарев Д.І. Ефективність групових польотів безпілотних літальних апаратів / Д.І. Бондарев, Р.Т. Джафарзаде, А.М. Козуб // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 6 (122). – С. 9-14.
17. Сизова О.А. Применение теории графов в различных видах научной деятельности / О.А. Сизова // Вестник Костанайского государственного педагогического института. – Костанай : КГПИ, 2012 – № 4. – С. 114-118.
18. Олифер Ю. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы : учебник для вузов / Ю. Олифер. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.
19. Кориунов Ю. Математические основы кибернетики : учебник для вузов / Ю. Кориунов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 495 с.
20. Ганин С.М. Беспилотные летательные аппараты / С.М. Ганин, А.В. Карпенко. – СПб : Невский бастион, 1999. – 160 с.
21. Зыков А.А. Основы теории графов : учебник для вузов / А.А. Зыков. – М.: «Вузовская книга» 2004. – 322 с.
22. Иноземцев Д.П. Беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Д.П. Иноземцев. – СПб.: ООО «ПЛАЗ», 2014 – 50 с.

Надійшла до редколегії 16.07.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук ст. наук. співр. Є.О. Українець, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МОДЕЛИ ГРУППОВЫХ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ГРАФОВ

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

В статье проведен анализ, систематизация и кодирования типов беспилотных летательных аппаратов по существующим классификациям. Введено показатели эффективности группового полета в виде времени, площади и плотности покрытия. Выполнен сравнительный анализ эффективности применения летательных аппаратов по целевому назначению. Построено матрицы смежности, инцидентий, расстояний для полносвязной структуры группы летательных аппаратов. Определена целесообразность применения современных сетевых технологий для анализа топологии группы самолетов.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, классификация, целевое назначение, теория графов, матрицы смежности, инцидентий, расстояний, топология.

## MODELS OF GROUP FLIGHTS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES USING GRAPH THEORY

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

The article analyzes, classification and coding types of unmanned aerial vehicles to existing classifications. Permission group flight performance indicators in terms of time, space and the density of the coating. Completion of a comparative analysis of the effectiveness of aircrafts for its intended purpose. Built adjacency matrix, incidence, distance to a full mesh structure of the group of aircraft. Determine whether the use of modern network technology for the analysis of the topology of the aircraft.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, classification, purpose, graph theory, the adjacency matrix, incidence, distances, topology.