



О. Ю. Луньов

МОДЕЛЬ РАЦІОНАЛЬНОГО РУХУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ОСНОВІ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ З ПРИПИНЕННЯ МАСОВИХ ЗАВОРУШЕНЬ СИЛАМИ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ

Розроблено модель руху розвідувальних безпілотних літальних апаратів під час виконання завдань з припинення масових заворушень, яка ґрунтується на визначенні раціональної довжини маршруту розвідки на основі розв'язування задачі комівояжера. Проведено аналіз методів розв'язування задачі комівояжера, одержано варіант раціонального маршруту польоту безпілотних літальних апаратів. Проведено оцінювання ефективності моделі руху розвідувальних безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, масові заворушення, задача комівояжера.

Постановка проблеми. Національна гвардія України (НГУ) є основним суб'єктом з припинення масових заворушень. Під час здійснення заходів з припинення масових заворушень НГУ координує діяльність сил та засобів правоохоронних органів, залучених до припинення зазначених протиправних дій [1].

Масові заворушення не є стихійно виникаючим суспільним явищем, це складний і досить дієвий інструмент досягнення конкретних цілей окремих осіб, груп осіб або партій (блоків). Завдання з ліквідації масових заворушень є одним з основних завдань сил охорони правопорядку, до яких належить і Національна гвардія України. Ефективність виконання завдань з припинення масових заворушень силами НГУ залежить від оперативності, об'єктивності та повноти розвідувальної інформації. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяє підвищити якість розвідки. Практика показує, що відсутність або несвоєчасність розвідувальної інформації, особливо за умов різких змін обстановки, може призвести до зриву поставленого завдання. Існуючі методи розвідки із застосування безпілотних літальних апаратів мають низку недоліків, подолання їх можливе внаслідок розроблення раціональних тактичних прийомів. До основних недоліків застосування БПЛА мультикоптерного типу під час виконання завдань з припинення масових заворушень

можна віднести: відносно невеликий час перебування у повітрі, обмеження на висоту польоту у місті, підвищену небезпеку польоту у місті, вплив на застосування БПЛА погодних умов. Одним із можливих шляхів збільшення часу перебування БПЛА у повітрі є отримання раціонального (найкоротшого) маршруту його руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання участі сил НГУ у припиненні масових заворушень досить докладно висвітлені у [1]. У працях [2, 4, 5] розглянуто математичний апарат розв'язування задачі комівояжера. Тематика застосування безпілотних літальних апаратів у різних сферах діяльності людини останнім часом набула великої актуальності. Питанню дослідження проблем застосування БПЛА присвячено працю [4]. Водночас застосуванню БПЛА у спеціальній операції з припинення масових заворушень приділено недостатньо уваги. У джерелах немає даних про раціональні тактичні прийоми застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів під час виконання завдань з припинення масових заворушень силами НГУ.

Мета статті – розроблення моделі раціонального руху розвідувальних безпілотних літальних апаратів під час виконання завдань з припинення масових заворушень силами Національної гвардії України.

Виклад основного матеріалу. Для припинення масових заворушень у населених пунктах Національній гвардії потрібна своєчасна і достовірна інформація для підготовки груп бойового порядку до спеціальної операції [1]. Для забезпечення розвідувальних дій використовується інформація, яка надходить від розвідувальних БПЛА. Група оперативного інформування проводить за допомогою ГІС “Інструмент” розташування на електронній карті місцевості ймовірних точок масових скупчень громадян, які підлягають розвідці. За допомогою ГІС “Інструмент” визначаються відстані між точками масових скупчень. У результаті отримуємо повновагий граф, де вершини – це точки масових скупчень громадян, а ребра – відстані між точками.

Постановка задачі. БПЛА повинен відвідати кожную точку один раз, початок руху з визначеної точки і повернення до неї. Потрібно знайти найкоротший маршрут, знаючи відстані між кожною парою точок. Математична постановка задачі: у повновагому графі потрібно знайти Гамільтонів цикл мінімальної ваги. Під вагою циклу розуміється сума ваг складових його ребер. Для розв'язування цієї задачі існує простий алгоритм – повний перебір усіх можливих варіантів. Однак такий підхід зазвичай неприйнятний через надзвичайно

велику кількість цих варіантів (якщо кількість точок n , то кількість усіх можливих обходів $(n-1)/2$). Ця задача є задачею комівояжера (ЗК), що з позиції обчислювання вважається досить важкою.

Аналіз методів розв'язування задачі комівояжера. Протестовано найбільш оптимальні методи розв'язування ЗК на ПЕОМ за такими показниками: кількість точок, час обробки, імовірність неправильної відповіді. Дані наведені у табл. 1.

За результатами табл. 1 алгоритм перебору можна застосовувати лише у випадку з кількістю точок 5-12. Метод гілок і меж можна застосовувати у разі кількості точок до 100.

Розв'язування задачі комівояжера методом гілок і меж. Графом G називається непорожня скінченна множина, що складається з двох підмножин V і E . Перша підмножина $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ (вершини) складається з будь-якої множини елементів. Друга підмножина E (ребра) складається з упорядкованих пар елементів першої підмножини $(u, v), u, v \in V$. Якщо вершини u і v такі, що $(u, v) \in E$, то це вершини суміжні. Маршрутом у графі G називається послідовність вершин u_1, u_2, \dots, u_m , не обов'язково попарно різних, де для будь-якого $1 \leq i \leq m, u_{i-1}$ суміжне з u_i . Маршрут називається ланцюгом, якщо всі його ребра попарно різні.

Таблиця 1

Результати тестування методів розв'язування задачі комівояжера

| Алгоритм перебору | | | |
|---------------------------------|-------------------|------------------------------------|---------------|
| Кількість точок | Час обробки, с | Імовірність неправильної відповіді | Тип алгоритму |
| 10 | 41 | 0 | Точний |
| 12 | 12000=3 год 20 хв | 0 | |
| 32 | ~∞ | 0 | |
| 100 | ~∞ | 0 | |
| Метод гілок та меж | | | |
| 10 | ~0,0000001 | 0 | Точний |
| 32 | ~0,0001 | 0 | |
| 100 | 1,2 | 0 | |
| Інші алгоритми розв'язування ЗК | | | |
| 10 | 0,001 | 0 | Приблизний |
| 32 | 2,5 | 0 | |
| 100 | 6 | 0 | |

Якщо $u_1 = u_m$, то маршрут називається замкнутим. У випадку застосування БПЛА (повернення у визначену точку старту) замкнутий ланцюг буде циклом [2–5].

Постановка завдання. БПЛА повинен облітати n точок. Потрібно побудувати такий маршрут, щоб облітати всі точки по одному разу і повернутися у вихідну точку, маючи мінімальну довжину маршруту. У термінах теорії графів завдання можна сформулювати таким чином. Визначені n вершин і матриця $\{c_{ij}\}$, де $c_{ij} \geq 0$ – довжина дуги (i, j) , $1 \leq i, j \leq n$. Під маршрутом БПЛА будемо розуміти цикл $i_1, i_2, \dots, i_n, i_1$ точок $1, 2, \dots, n, 1$. Отже, маршрут є набором дуг. Якщо між точками i та j немає переходу, то у матриці ставиться символ “нескінченність”. Він обов’язково ставиться по діагоналі, що означає заборону на повернення в точку, через яку вже проходив маршрут БПЛА, довжина маршруту $l(z)$ дорівнює сумі довжин дуг, що входять у маршрут. Нехай Z – множина всіх можливих маршрутів. Початкова вершина i_1 є фіксованою. Потрібно знайти маршрут z_0 такий, що $l(z_0) = \min\{l(z) \mid z_0 \in Z\}$.

Розв’язування. За допомогою методу гілок і меж спочатку будують нижню межу φ довжин множини маршрутів Z . Потім множина маршрутів розбивається на дві підмножини таким чином, щоб перша підмножина Z_{ij}^1 складалася з маршрутів, які містять деяку дугу (i, j) , а інша підмножина Z_{ij}^1 не містила цієї дуги. Для кожної з підмножин визначаються нижні межі за тим же правилом, що і для початкової множини маршрутів. Отримані нижні межі підмножин Z_{ij}^1 і Z_{ij}^1 виявляються не менші за нижню межу множини всіх маршрутів, тобто $\varphi(Z) \leq \varphi(Z_{ij}^1)$, $\varphi(Z) \leq \varphi(Z_{ij}^1)$. Порівнюючи нижні межі $\varphi(Z_{ij}^1)$ і $\varphi(Z_{ij}^1)$, можна виділити ту підмножину маршрутів, яка з більшою ймовірністю містить маршрут мінімальної довжини. Потім одна з підмножин Z_{ij}^1 або Z_{ij}^1 за аналогічним правилом розбивається на два нових Z_{ij}^2 або Z_{ij}^2 . Для них знову відшукуються нижні межі $\varphi(Z_{ij}^2)$ і $\varphi(Z_{ij}^2)$ і т. д. Процес розгалуження продовжується доти, поки не знайдеться єдиний маршрут. Його називають першим рекордом. Потім переглядають обірвані гілки. Якщо їх нижні межі більші за довжину першого рекорду, то завдання виконано. Якщо

ж є такі, для яких нижні межі менші, ніж довжина першого рекорду, то підмножина з найменшою нижньою межею підлягає подальшому розгалуженню, поки не переконуються, що цей рекорд не містить кращого маршруту. Якщо ж такий знайдеться, то аналіз обірваних гілок триває до нового значення довжини маршруту. Його називають другим рекордом. Процес розв’язування закінчується, коли будуть проаналізовані всі підмножини. Для практичної реалізації методу гілок і меж стосовно до задачі комівояжера вкажемо прийом визначення нижніх меж підмножин і розбиття множини маршрутів на підмножини. Щоб знайти нижню межу, до елементів будь-якого рядка матриці задачі комівояжера (рядка або стовпця) слід додати або відняти від них деяке число, від цього оптимальність плану не зміниться. Довжина ж будь-якого маршруту БПЛА зміниться на цю величину. Віднімемо від кожного рядка число, що дорівнює мінімальному елементу цього рядка. Віднімемо з кожного стовпця число, що дорівнює мінімальному елементу цього стовпця. Отримана матриця називається зведеною по рядках і стовпцях. Сума всіх віднятих чисел називається константою зведення. Константу зведення слід вибирати як нижню межу довжини маршрутів.

Розбиття множини маршрутів на підмножини. Для виділення претендентів на включення до множини дуг, за якими проводиться розгалуження, розглянемо у зведеній матриці всі елементи, що дорівнюють нулю. Знайдемо ступені Θ_{ij} нульових елементів цієї матриці. Ступінь нульового елемента Θ_{ij} дорівнює сумі мінімального елемента у рядку i та мінімального елемента у стовпці j (під час вибору цих мінімумів c_{ij} не враховується). З найбільшою ймовірністю шуканого маршруту належать дуги з максимальним ступенем нуля [2, 4, 5].

Довжина маршруту L_p отримується у результаті розв’язання задачі комівояжера. Алгоритм дій під час створення маршруту такий.

1. За допомогою ГІС “Інструмент” вимірюються відстані між усіма точками маршруту (створюється граф відстаней між точками розвідки).

2. Проводиться розв’язування задачі комівояжера (визначається найкоротший маршрут).

3. Для створення маршруту руху з урахуванням зон видимості застосовується ГІС “Інструмент”.

О. Ю. Луньов. Модель раціонального руху безпілотних літальних апаратів на основі розв’язування задачі комівояжера під час виконання завдань з припинення масових заворушень силами Національної гвардії України

Приклад матриці відстаней наведено у табл. 2.

Розв’язанням задачі комівояжера отримано варіант раціонального маршруту польоту під час повітряної розвідки БПЛА (подано на рисунку).

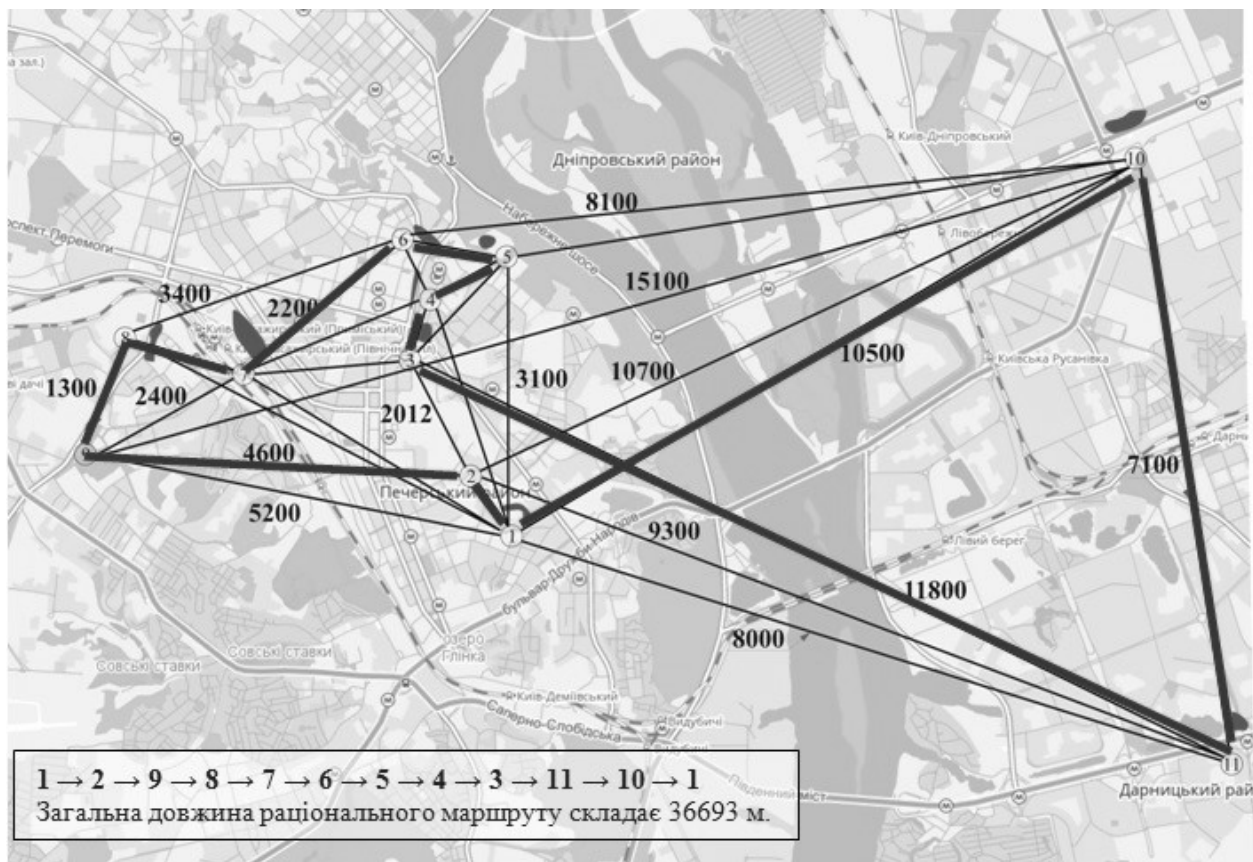
Оцінювання ефективності моделі. Вибрано 5 маршрутів руху БПЛА під час розвідки

методом експертних опитувань (див. табл. 3). Середнє арифметичне довжин маршрутів складає 42585 м. У порівнянні з отриманим раціональним маршрутом середнє арифметичне значення довжини маршруту БПЛА на 16 % більше. Дані довжин маршрутів наведені у табл. 3.

Таблиця 2

Матриця відстаней між точками розвідки

| № точки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | М | 278 | 2300 | 2900 | 3100 | 2800 | 3700 | 4600 | 5200 | 10500 | 9300 |
| 2 | 278 | М | 2012 | 2600 | 2900 | 2500 | 3500 | 4400 | 5000 | 10700 | 8000 |
| 3 | 2300 | 2012 | М | 641 | 859 | 560 | 2500 | 3700 | 4800 | 11800 | 7800 |
| 4 | 2900 | 2600 | 641 | М | 294 | 336 | 2600 | 3800 | 5000 | 12200 | 7800 |
| 5 | 3100 | 2900 | 859 | 294 | М | 380 | 2400 | 3600 | 4900 | 12400 | 8000 |
| 6 | 2800 | 2500 | 560 | 336 | 380 | М | 2200 | 3400 | 4600 | 12300 | 8100 |
| 7 | 3700 | 3500 | 2500 | 2600 | 2400 | 2200 | М | 1200 | 2400 | 14100 | 10400 |
| 8 | 4600 | 4400 | 3700 | 3800 | 3600 | 3400 | 1200 | М | 1300 | 15100 | 11500 |
| 9 | 5200 | 5000 | 4800 | 5000 | 4900 | 4600 | 2400 | 1300 | М | 15600 | 12600 |
| 10 | 10500 | 10700 | 11800 | 12200 | 12400 | 12300 | 14100 | 15100 | 15600 | М | 7100 |
| 11 | 9300 | 8000 | 7800 | 7800 | 8000 | 8100 | 10400 | 11500 | 12600 | 7100 | М |



Варіант раціонального маршруту польоту БПЛА

Приклади маршрутів руху БПЛА

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|
| № точки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Σ |
| L _p | 278 | 2012 | 641 | 294 | 380 | 2200 | 1200 | 1300 | 15600 | 7100 | 9300 | 40305 |
| № точки | 1 | 5 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 | 3 | 2 | 11 | 10 | Σ |
| L _p | 3100 | 294 | 336 | 2200 | 1200 | 1300 | 4800 | 2012 | 8000 | 7100 | 10500 | 40842 |
| № точки | 1 | 10 | 11 | 5 | 6 | 4 | 3 | 7 | 8 | 9 | 2 | Σ |
| L _p | 10500 | 7100 | 8000 | 380 | 336 | 641 | 2500 | 1200 | 1300 | 5000 | 278 | 37235 |
| № точки | 1 | 9 | 8 | 7 | 3 | 6 | 5 | 4 | 2 | 10 | 11 | Σ |
| L _p | 5200 | 1300 | 1200 | 2500 | 560 | 380 | 294 | 2600 | 10700 | 7100 | 9300 | 41134 |
| № точки | 1 | 4 | 5 | 6 | 3 | 10 | 7 | 8 | 9 | 11 | 2 | Σ |
| L _p | 2900 | 294 | 380 | 560 | 11800 | 14100 | 1200 | 1300 | 12600 | 8000 | 278 | 53412 |
| № точки | 1 | 2 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 11 | 10 | Σрац. |
| L _p | 278 | 5000 | 1300 | 1200 | 2200 | 380 | 294 | 641 | 7800 | 7100 | 10500 | 36693 |

Висновок

Існуючі алгоритми і методи мають велику трудомісткість та незадовільні часові показники пошуку. Розв'язування задачі комівояжера проводилося методом гілок та меж, що дозволяє опрацювати до 100 вершин графа розвідки без суттєвих часових та програмно-апаратних витрат. Застосування моделі раціонального руху БПЛА дало змогу скоротити маршрут руху БПЛА на 16 %.

Список використаних джерел

1. Лавніченко, О. В. Оперативне застосування та тактика дій внутрішніх військ. Ч. 1. Основи службово-бойового застосування внутрішніх військ [Текст] : навч. посіб. / О. В. Лавніченко, Г. А. Дробаха. – Харків : Акад. ВВ МВС України, 2008. – 418 с.

2. Бартіш, М. Я. Дослідження операцій. Частина 1. Лінійні моделі [Текст] : підручник / М. Я. Бартіш, І. М. Дудзяний. – Львів : Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. – 168 с.

3. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов [Текст] : справ. пособие / А. Г. Гребеников, А. К. Мялица, В. В. Парфенюк и др. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2008. – 377 с.

4. Оре, О. Теория графов [Текст] / О. Оре. – 2-е изд. – Москва : Наука, Глав. редакция физико-математической литературы, 1980. – 336 с.

5. Хемди, А. Таха. Введение в исследование операций [Текст] : пер. с англ. / Хемди А.Таха. – 7-е изд. – Москва : Вильямс, 2005. – 912 с.

Стаття надійшла до редакції 04.03.2019 р.

УДК 358.421:355.424.4:355.404.4

А. Ю. Лунев

МОДЕЛЬ РАЦИОНАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОМИВОЯЖЕРА ВО ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ПРЕКРАЩЕНИЮ МАССОВЫХ БЕСПОРЯДКОВ СИЛАМИ НАЦИОНАЛЬНОЙ ГВАРДИИ УКРАИНЫ

Разработана модель движения разведывательных беспилотных летательных аппаратов во время выполнения заданий по прекращению массовых беспорядков, которая базируется на определении рациональной длины маршрута разведки на основе решения задачи комивояжера. Осуществлен анализ методов решения задачи комивояжера, получен вариант рационального маршрута полета беспилотных летательных аппаратов. Проведена оценка эффективности модели движения разведывательных беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, массовые беспорядки, задача комивояжера.

UDC 358.421:355.424.4:355.404.4

O. Yu. Lunyov

THE MODEL OF THE RATIONAL MOVEMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON THE SOLUTION OF TRAVELING SALESMAN PROBLEM WHEN PERFORMING TASKS IN THE RIOT CONTROL FORCES OF THE NATIONAL GUARD OF UKRAINE

The National Guard of Ukraine is the main subject to end the riot. In carrying out measures to stop the massive riots, the National Guard of Ukraine coordinates the activities of forces and means of law enforcement involved in the termination of these unlawful actions. Mass riots is not a spontaneously emerging social phenomenon, but is a complex and sufficiently effective tool for achieving the specific goals of individuals, groups of people or parties. The task of eliminating the riots is one of the main tasks of the law enforcement forces, including the National Guard of Ukraine. The effectiveness of the tasks of ending the riot by the forces of the National Guard of Ukraine depends on the speed, objectivity and completeness of intelligence information. The use of unmanned aerial vehicles can improve the quality of intelligence. Practice shows that the lack or lack of timely intelligence information, especially in the context of abrupt changes in the situation, can lead to failure of the task. Existing methods of reconnaissance for the use of unmanned aerial vehicles have a number of shortcomings, overcoming them may be due to the development of rational tactical techniques. The main drawbacks of the use of unmanned aerial vehicles of the multi-copy type in the performance of tasks to stop the massive disturbances can be attributed: a relatively small time in the air, restrictions on the flight altitude in the city, increased risk of flight in the city, the impact on the use of unmanned aerial vehicles. One of the possible ways to increase the time of landing unmanned aerial vehicles in the air is to get the rational (shortest) way of its movement.

In the article the model of motion of reconnaissance unmanned aerial vehicles is developed in the course of performing tasks to stop the massive disturbances, which is based on the determined rational length of the intelligence route based on the solution of the problem of the Traveler. The analysis of methods for solving the problem of the salesman has been carried out; the variant of the rational flight route of unmanned aerial

vehicles has been obtained. An estimation of efficiency of the model of motion of reconnaissance unmanned aerial vehicles is carried out. Existing algorithms and methods have great complexity and unsatisfactory search times. The task of the salesman was carried out by the method of branches and borders, which allows processing up to 100 vertices of the intelligence graph without significant time and software and hardware costs. The use of a model of rational movement of unmanned aerial vehicles during exploration allowed to reduce the way by 16 percent.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, mass riots, the salesman's method.*

Луцьов Олексій Юрійович – заступник начальника – начальник навчальної частини гуманітарного факультету Національної академії Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0002-6599-5331>