

УДК 004.896+623.746.2

Опубліковано 8 квітня 2021 року

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ НА ОСНОВІ МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ

ОЛЕКСЕНКО Олександр Олександрович 

ад'юнкт науково-організаційного відділу
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

ЯРОШЕНКО Ярослав Віталійович 

ад'юнкт кафедри авіації
Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського

УКРАЇНА

Анотація: Запропоновано використання мурашиного алгоритму для визначення маршрутів польоту безпілотного літального апарата (БПЛА) до об'єктів розвідки (удару). В алгоритмі рішення будується в ітераційному процесі багатьма агентами (мурахами), які взаємодіють між собою через стігмержі – шляхом внесення змін в навколишнє середовище, а саме, відкладенням феромонів на маршрутах, причому вищий рівень феромону відкладається на кращих маршрутах. Прокладання маршрутів польоту буде здійснюватись з урахуванням наявності на маршруті перешкод "зон небезпеки". Досліджена робота макс-мінного мурашиного алгоритму при наявності на можливих маршрутах польоту таких перешкод. Результати досліджень в цілому позитивні і вказують на можливість вирішення поставленого завдання з використанням мурашиного алгоритму.

ВСТУП.

Задачі планування маршруту польоту традиційно зводяться до різного роду оптимізаційних постановок [1]. Основними методами є: повний перебір [1], динамічне програмування [2], генетичні алгоритми [3], жадібні алгоритми, метод сходження [4] та інші [5, 6].

Повний перебір [1] усіх можливих варіантів є самим простим розв'язанням даної задачі, знайдене рішення завжди оптимальне, але час

розв'язання задачі росте за експонентою. В методі динамічного програмування недоліком є обов'язкова лінійність цільової функції [2] та не забезпечує достатньої швидкодії і не працює у нестационарних системах. Перевагами генетичного методу [3] є практично повна незалежність від характеристик простору пошуку, мала залежність від вибору критерію оптимальності. Недоліком методу складність реалізації та значна залежність від вибору варіанта кодування хромосом. Принцип роботи жадібного алгоритму [4] зводиться до знаходження оптимального рішення для кожної локальної задачі. Перевагами методу є простота реалізації, швидкість роботи, відомий заздалегідь час пошуку., недоліком методу є те що рішення глобальної задачі може в загальному випадку не бути оптимальним.

У [5, 6] розглянута побудова та оптимізація маршрутів з використанням методів оптимізації на графах (розв'язання класичної задачі комівояжера). Побудова маршруту польоту зводиться до формування послідовності обльоту точок, розташування яких на земній поверхні вважається апріорі заданим. При цьому в якості критерію, що мінімізується виступає довжина маршруту. В той же час слід зауважити, що порядок обґрунтування вибору точок залежно від завдань БПЛА в даних працях не приводиться.

У роботах [2] запропоновано оптимізацію на графах з використанням алгоритму Літтла, який виділено як один із точних розв'язків задачі комівояжера. Недоліком методів [2] є не врахування специфіки застосування та можливостей оптимізації маршруту безпосередньо для БПЛА. У [7] розглянуто методи кластеризації вибору маршрутів з подібними ознаками. Проаналізовано основні підходи до їх вирішення, виділено переваги та недоліки різних методів кластеризації. Але методи [7] не враховують особливості планування маршрутів польоту, а саме висоти, швидкості польоту та інше.

У роботах [8], автори відмовилися від зведення задачі маршрутизації до різновидів задачі комівояжера. У роботах [8], використовується метод лінійного булевого програмування. Перевагами методу є можливість врахування більшої кількості факторів пов'язаних з використанням БПЛА. У роботі [9] оптимальний маршрут польоту БПЛА знаходиться з урахуванням обмеження на допустиму тривалість польоту. У роботі [9] додатково враховується нерівноцінність точок, що включаються в маршрут. Але в [8, 9, 10] не розглядаються випадки коли, на шляху

заданого руху БПЛА можуть бути виявлені раптові перешкоди ("зон небезпеки"). Це вимагає перепланування польоту БПЛА в автоматичному режимі, що є складним завданням. Результати робіт [11, 12] вимагають створення відповідної методики визначення оптимального маршруту польоту БПЛА з урахуванням наявності на маршруті "зон небезпеки".

ОСНОВНА ЧАСТИНА.

В останні роки набувають розвитку метаевристичні методи штучного інтелекту, до яких відноситься мурашиний алгоритм або метод мурашиних колоній (в англійській літературі – Ant System (AS)), запропонований М. Доріго в 1992 році [13]. Спочатку алгоритм використовувався для пошуку найкоротшого шляху в графах, подальші дослідження, як західних [14], так і вітчизняних вчених [15], призвели до появи багаточисельних модифікацій алгоритму та продемонстрували його універсальність для вирішення широкого кола оптимізаційних задач. Однією з важливих переваг алгоритму являється його висока ефективність при оптимізації розподілених нестационарних систем [16]. При змінах досліджуваної системи алгоритм швидко адаптується до цих змін і знаходить нове оптимальне рішення. Названі вище, а також інші переваги алгоритму (такі, як, наприклад, швидкодія) роблять актуальним проведення дослідження стосовно можливості застосування мурашиного алгоритму та його різновидів для розробки оптимального маршруту польоту БПЛА.

Мурашині алгоритми основані на імітації природних механізмів самоорганізації колонії мурах. Колонія мурах розглядається як мультиагентна система, в якій кожний агент (мураха) діє по дуже простим правилам. На протидію примітивній поведінці мурах, поведінка всієї системи являється надзвичайно розумною, що забезпечує мурахам як виду існування на Землі вже понад 100 мільйонів років. Самоорганізація системи забезпечується низькорівневою взаємодією агентів, при цьому агенти обмінюються тільки локальною інформацією, а будь-яке централізоване управління системою, направлене на досягнення глобальних цілей, виключається. Самоорганізація є результатом взаємодії наступних чотирьох компонентів: багатократності повторення (реалізовується ітераційним пошуком маршруту декількома

мурахами одночасно); випадковості (чим коротший маршрут “Іжа – Мурашник”, тим частіше мураха зможе пройти його за фіксований час); позитивного зворотного зв'язку (реалізується імітацією поведінки мурах типу “залишення слів – пересування за слідами”); негативного зворотного зв'язку (реалізується через випаровування феромону). Для передачі локальної інформації агенти використовують так звані стігмержі (stigmergy) – рознесений в часі тип взаємодії, коли один агент змінює деяку частину навколишнього середовища, а інші агенти спостерігають ці зміни через деякий час, коли знаходяться у відповідній точці середовища, та використовують відповідну інформацію у своїй діяльності. Мурахи застосовують стігмержі шляхом виділення феромону (pheromone) – спеціального секрету, який відкладається мурахою на своєму маршруті в процесі пошуку їжі та під час повернення з їжею до мурашника. Наступний мураха, який буде знаходитись поблизу маршруту руху першого, сприймає феромон та з високою ймовірністю продовжить рух до їжі по шляху першого мурахи, в свою чергу відкладаючи феромон (підвищуючи його концентрацію на маршруті). Чим вище концентрація феромону на маршруті, тим вища привабливість цього маршруту для наступних мурах, і тим більше мурах вибере саме цей маршрут. Розподіл феромону в навколишньому середовищі являється немовби динамічною пам'яттю системи. Кожний мураха в певний момент часу сприймає та змінює одну градку цієї пам'яті – рівень феромону в околиці точки, в якій мураха знаходиться.

Концентрація феромону, відкладеного на маршруті, зворотно пропорційна його довжині. Чим коротше буде маршрут, тим більшою буде концентрація феромону на ньому, в результаті більш короткий маршрут збережеться у глобальній пам'яті мурашника як більш вдалий і з вищою ймовірністю буде обраний наступними мурахами.

З часом феромон випаровується, що забезпечує зворотній зв'язок. Оскільки, як зазначено вище, концентрація феромону буде поступово збільшуватись на вдалих маршрутах, а швидкість випаровування феромону є постійною, через деякий час невдалі маршрути зникнуть, і все більше мурах будуть здійснювати рух лише по вдалих маршрутах. Використання зворотного зв'язку (випаровування) попереджує завчасну сходимість рішень – вибір мурахами одного і того ж субоптимального маршруту.

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ПРОКЛАДЕННЯ МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ БПЛА.

В найпростішому випадку маршрут польоту БПЛА можна представити як сукупність наступних ділянок: ділянки зльоту з вихідної точки маршруту (ВТМ) та набору висоти, горизонтальних ділянок, на яких відбувається крейсерський політ, вихід на об'єкт розвідки (удару), ділянка зниження до рубежу виконання завдання (РВЗ) або кінцевої точки маршруту (КТМ). Горизонтальні ділянки проходять через поворотні точки маршруту (ПТМ), в яких відбувається зміна курсу, а в загальному випадку, і висоти польоту (рис.1). У подальшому вважаємо, що положення ВТМ, КТМ та поворотних точок маршруту повністю визначає маршрут польоту БПЛА.

Політ по кожній з ділянок маршруту, а також здійснення маневру в вибраних ПТМ, має певні небезпеки для БПЛА та вимагає певних витрат ресурсів, що призводить до наявності переваги одного маршруту польоту перед іншим. Оскільки варіантів просторового розташування поворотних точок маршруту може бути дуже багато, кількість можливих маршрутів польоту БПЛА буде надзвичайно великою, що ускладнює вибір маршруту БПЛА методом перебору. В [13] наведені підходи щодо застосування для пошуку раціонального маршруту методу динамічного програмування, проте і цей метод не забезпечує достатньої швидкодії та не працює у нестационарних системах. Продемонструємо, як прокласти маршрут з використанням мурашиного алгоритму.

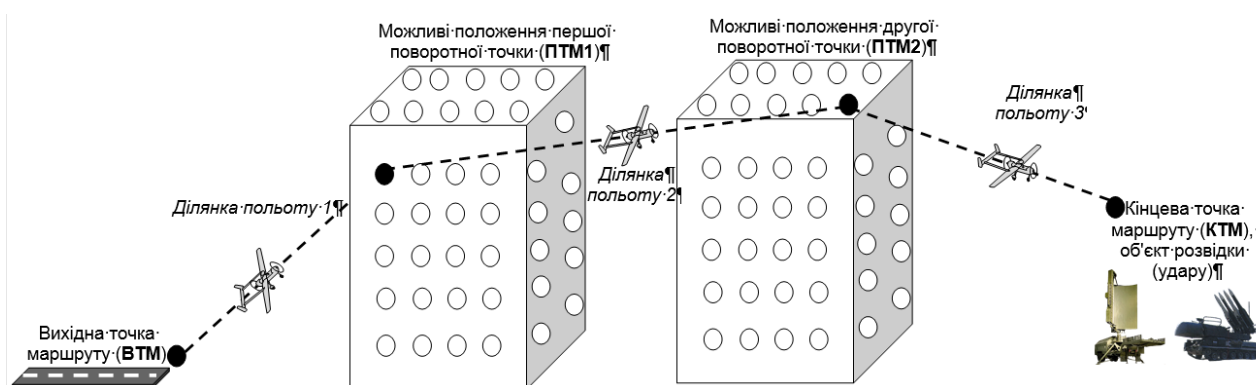


Рис 1. Приклад представлення маршруту польоту БПЛА

В мурашиному алгоритмі в кожній ітерації ітераційного процесу m агентами здійснюється пошук рішення та оновлення феромонів на

знайденому маршруті. Кожний k -й агент починає шлях з ВТМ, послідовно проходить вибрані алгоритмом поворотні точки маршруту і звершує шлях в КТМ. Вибір ПТМ з J можливих здійснюється на основі ймовірнісного правила, що визначає ймовірність переходу k -го агента в i -у ПТМ з врахуванням доступності i -ї ділянки маршруту L_i та концентрації феромонів на цій ділянці F_i в момент часу t наступним чином:

$$P_i^k(t) = \frac{F_i(t)^\alpha \cdot L_i^\beta}{\sum_{j=1}^J F_j(t)^\alpha \cdot L_j^\beta}, \quad (1)$$

де $\alpha \geq 0$ і $\beta \geq 0$ – два регульовані параметри, що задають вагу феромона і доступності ділянки, відповідно.

При $\alpha = 0$ агенти на кожному кроці переходять в найближчу ПТМ і AS перетворюється в “жадібний” алгоритм класичної теорії оптимізації. При $\beta = 0$ враховується тільки вплив феромонів, що швидко приведе рішення до субоптимального. Для забезпечення доброї динаміки в [9] рекомендується встановлювати $\beta > \alpha$, М. Доріго було відкрито ряд комбінацій α і β , які дозволяють знаходити добрі результати за найкоротший час.

За правилом (1) знаходяться ймовірності вибору тієї чи іншої ПТМ. Сам вибір здійснюється за принципом “колеса рулетки”. Це може бути реалізовано, наприклад, розподілом деякого відрізка довжиною S на J частин довжиною, пропорційною P_i , генерування рівномірно розподіленого в інтервалі [13] випадкового числа та вибору ПТМ відповідно до того, в яку за порядковим номером частину відрізка S попадає випадкове число.

Доступність ділянки маршруту L_i в найпростішому випадку може бути розрахована за виразом (2):

$$L_i = \frac{l}{D_i}, \quad (2)$$

де D_i – довжина i -ї ділянки маршруту.

В більш складних випадках значення L_i може бути розраховане в залежності від наявності “зон небезпеки” на ділянці польоту.

На початку ітераційного процесу кількість феромону на ділянках

маршруту приймається однаковою і рівною деякому невеликому числу F_0 . Після кожної ітерації концентрація феромонів на вибраних агентами ділянках оновлюється за правилом (3):

$$F_i(t+1) = (1-\rho)F_i(t) + \sum_{k=1}^m \Delta F_i^k, \quad (3)$$

де $\rho \in [0,1]$ – швидкість випаровування феромону (*Pheromone evaporation*), в [9] рекомендується встановлювати $\rho > 0,5$, при $\rho < 0,5$ результати тестувань були незадовільні;

ΔF_i^k – концентрація феромону на i -й ділянці маршруту, що створюється проходженням k -го агента.

У тому випадку, якщо у поточній ітерації по ділянці не пройшов жодний з агентів, правило (3) перетворюється на:

$$F_i(t+1) = (1-\rho)F_i(t), \quad (4)$$

тобто оновлення феромону полягає в його випаровуванні із швидкістю ρ .

Базовий AS вирішує задачі оптимізації з великою розмірністю з точністю на рівні інших евристичних методів, таких, як генетичний алгоритм, чи імітація відпалу. Базового мурашиного алгоритму недостатньо для вирішення поставленого завдання. Тому для покращення результатів роботи використовуються покращені мурашині алгоритми (ASE – базовий мурашиний алгоритм з елітними мурашками, ASR – ранговий мурашиний алгоритм, ACS – алгоритм мурашиної колонії, MMAS – макс-мінний мурашиний алгоритм). В даній роботі пропонується застосовувати Макс-мінний мурашиний алгоритм (MAX-MIN Ant System), який у порівнянні з іншими різновидами AS знаходить кращі рішення за найкоротший час та має найкращу показник по критерію середньої відносної точності. Його характерними особливостями є те, що:

- на кожній ітерації феромони добавляються тільки на ребра (ПТМ) найкращого маршруту по правилу (5);

- кількість феромонів на маршруті між поворотними точками обмежено в діапазоні $[F_{min}, F_{max}]$;

- на початку роботи алгоритму кількість феромону на кожному ребрі графа приймається рівним F_{max} .

Отже, тільки найкращі агенти підвищують рівень феромону на своїх

маршрутах і рівень феромону на маршрутах обмежений. Оновлення рівня феромону на маршрутах здійснюється за правилом:

$$F_i(t+1) = [(1-\rho)F_i(t) + \Delta F_i^{best}] J_{F_{min}}^{F_{max}}, \quad (5)$$

де F_{max} та F_{min} – верхня та нижня межі рівня феромону;

$[x]_b^a$ – оператор, який визначається як:

$$[x]_b^a = \begin{cases} a, & \text{якщо } x > a \\ b, & \text{якщо } x < b, \\ x & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (6)$$

а ΔF_i^{best} визначається як:

$$\Delta F_i^{best} = \begin{cases} 1/L_{best}, & \text{якщо } i - \text{кращий маршрут в ітерації} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases}, \quad (7)$$

L_{best} – довжина маршруту кращого агента.

Це може бути або найкращий маршрут, знайдений в поточній ітерації, L_{ib} , або найкраще рішення, знайдене з початку роботи алгоритму, L_{bs} .

Дослідження показали, що для вирішення задач, аналогічних тим, що розглядаються в даній роботі, доцільніше використовувати MMAS.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОКЛАДАННЯ МАРШРУТУ БПЛА НА ОСНОВІ МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ.

Перевірка працездатності алгоритму MMAS була здійснена з використанням даних контрольного прикладу. Для наочності представлення результатів застосована прямокутна система координат, у якій ВТМ, КТМ і ПТМ знаходяться в одній горизонтальній площині. Доступність ділянок маршруту розраховувалась за (2). Вихідні дані:

кількість ВТМ $N_{ВТМ} = 1$;

кількість КТМ $N_{КТМ} = 1$;

кількість горизонтальних ділянок маршруту – 3;

кількість можливих перших ПТМ (ПТМ1) $N_{ПТМ1} = 20$;

кількість можливих других ПТМ (ПТМ2) $N_{ПТМ2} = 20$ (положення ВТМ,

КТМ, ПТМ1 та ПТМ2 показані на рис. 2);

вага феромонів $\alpha = 2$;

“жадібність” алгоритму $\beta = 1$;
 швидкість випаровування феромону $\rho = 0,001$;
 кількість ітерацій алгоритму $N = 400$;
 кількість агентів в ітерації $m = 100$;
 початкова кількість феромону $F_0 = 0,01$.

Очевидно, що для умов контрольного прикладу оптимальним маршрутом буде пряма від ВТМ до КТМ. На рис.2 послідовно показана робота алгоритму після 40, 80, 200 та 400 ітерацій.

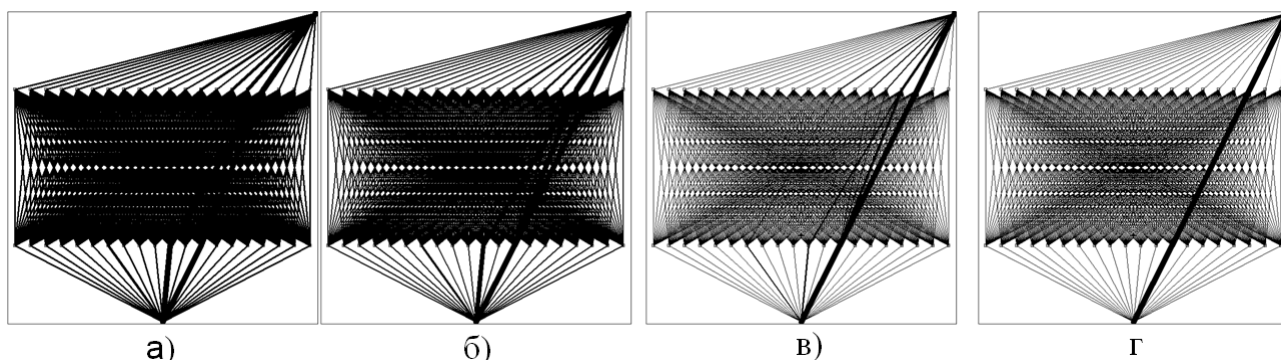


Рис 2 .Результати роботи MMAS для вихідних даних контрольного прикладу
 (а – після 40, б – після 80, в – після 200, г – після 400 ітерацій)

Після 40 ітерацій рівень феромону на всіх маршрутах ще незначно відрізняється від початкового рівня F_0 , проте агенти вже позначили феромонами два маршрути як кращі (більш жирні лінії). Після 80 ітерацій рівень феромону на всіх маршрутах, крім кращих, значно зменшується внаслідок випаровування (відповідні лінії стали тоншими), чітко виділяються три кращі маршрути, між якими в подальшому “йде суперечка”. Після 200 ітерацій вже чітко виділяється кращий маршрут, хоча декілька маршрутів ще намагаються “вести суперечку”, після 400 ітерацій кращий маршрут (який і є оптимальним), очевидно, домінує.

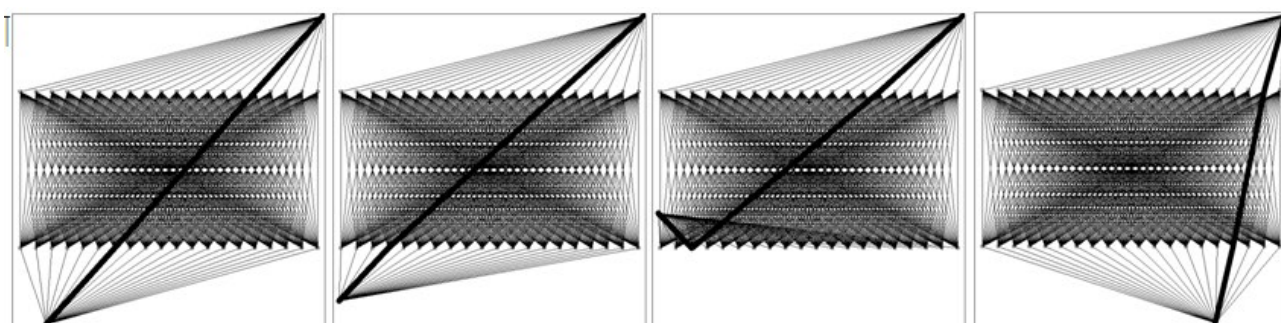


Рис 3. Результати роботи MMAS для різних положень ВТМ

На рис.3 показані результати роботи MMAS для різних положень ВТМ. В усіх випадках MMAS знаходив оптимальне рішення, що перевірялось методом перебору.

В наступному дослідженні перевірялась працездатність алгоритму MMAS при використанні критерію “найкоротший маршрут з тих, що огинають перешкоди”.

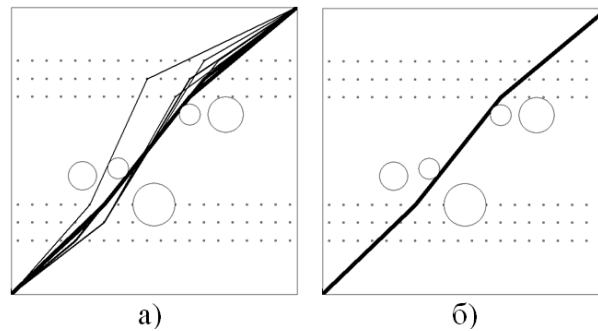


Рис 4. Робота MMAS при наявності “зон небезпеки”
а) після 100 ітерацій; б) після 300 ітерацій

Збільшено до 60 потужності множин ПТМ1 та ПТМ2. В середовище прокладання маршруту добавлені перешкоди (“зони небезпеки”), а доступність ділянки маршруту L_i розраховувалась як:

$$L_i = \begin{cases} 1/D_i, & \text{якщо } i\text{-й маршрут пролягає} \\ & \text{за межами "заборонених зон"} \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (8)$$

Результати роботи MMAS при наявності “зон небезпеки” показані на рис.4 В усіх випадках алгоритм знаходив найкоротший маршрут з тих, що не проходять через “заборонені зони”. Слід зауважити, що на рис.3 та рис. 4 не показані маршрути з рівнем феромонів нижче 5% від максимального.

ВИСНОВКИ З ТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Таким чином, в даній роботі розглянута можливість застосування мурашиного алгоритму MMAS для визначення маршрутів польоту БПЛА. Результати досліджень в цілому позитивні і вказують на можливість вирішення поставленого завдання з використанням мурашиного алгоритму. Прокладання маршрутів польоту буде здійснюватися з урахуванням наявності на маршруті перешкод, “зон небезпеки”.

Подальші дослідження можуть бути направлені на реалізацію тримірної пошуку маршрутів польоту БПЛА в географічних координатах з урахуванням розмірів поворотних точок маршруту, у яких БПЛА здійснюють маневр, та реальних розмірів і конфігурації заборонених зон, а також рельєфу місцевості. Практична реалізація закладених в статті положень також буде вимагати обґрунтування меж областей можливих положень поворотних точок маршруту та кроку їх табуляції. Авторами планується реалізація модифікації мурашиного алгоритму з безперервним середовищем, коли положення і кількість поворотних точок маршруту заздалегідь не визначені, а агенти переміщуються в кожній ітерації у випадковому напрямку та випадковим чином вибирають момент повороту. При цьому феромони мають відкладатись не тільки вздовж маршруту, а і в деякій його околиці. Відповідні дослідження ведуться авторами і будуть опубліковані в подальших роботах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Райгородский, А. М. (2012). *Экстремальные задачи теории графов и Интернет*. Москва: Интеллект.
- [2] Таран, И. А., Тристан, А. В., Паталаха, В. Г. (2015) Методика определения рационального маршрута полета летательного аппарата с использованием динамического программирования. *Вестник военного института Национальной гвардии Республики Казахстан*. (3 (17)). 34-42.
- [3] Урубков, А. Р., Федотов, И. В. (2011). *Методы и модели оптимизации управленческих решений*. Москва: Дело АНХ.
- [4] Сигал, И. Х., Иванова, А. П. (2003). *Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы*. Москва: ФИЗМАТЛИТ.
- [5] Макаров, И. М., Лохин, В. М., Манько, С. В. (2002) Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами на основе комплексного применения технологий нечеткой логики и ассоциативной памяти. *Авиакосмическое приборостроение*, (2). 29-36.
- [6] Моисеев, В.С. (2013). *Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами*. Казань: ГБУ РЦМКО.
- [7] Цимбалістова, О.А. (2015). Розвиток ринку послуг безпілотних літальних апаратів як основний напрямок інноваційного прогресу сучасної авіації. *Економічний аналіз*, (1). 116-122.
- [8] Станкевич, С. А., Васько, А. В. (2011). Застосування сучасних технологій аерокосмічного знімання в аграрній сфері. *Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій*. Київ. 44-50.
- [9] Радецький, В. Г., Руснак, І. С., Даник, Ю. Г. (2008). *Безпілотна авіація в сучасній збройній боротьбі*. Київ: НАОУ.

- [10] Моисеев, Д. В., Чинь, В. М. (2016). Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра с учетом ограничения на продолжительность полета. *Мехатроника, Автоматизация, Управление*,(3). 206–210.
- [11] Shchypanskyi, P., Savchenko, V., Martyniuk, O., Kostiuk, I. (2020). Air defense planning from an impact of a group of unmanned aerial vehicles based on multi-agent modeling. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, (8(4)),1302-1308.
- [12] V. Tyurin, O. Martyniuk, V. Mirnenko, P. Open'ko and I. Korenivska. General Approach to Counter Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, (pp. 75-78). 22-24 Oct. 2019, Kiev, Ukraine.
- [13] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (Part B, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, 1996.
- [14] T. Stutzle and H. H. Hoos. (2000). MAX-MIN Ant System. *Future Generation Computer Systems*, (vol. 16, no. 8). 889-914
- [15] Штовба, С.Д. (2003). Муравьиные алгоритмы. *Exponenta Pro. Математика в приложениях*, (4). 70-75.
- [16] Caro G. D., Dorigo M. (1997). Anet: a Mobile Agents Approach to Adaptive Routing. *Technical Report IRIDA 97-12. IRIDA*. Brussels, Belgium: niversite Libre de Brusseles.